

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Вдосконалення алгоритмів маршрутизації в мобільних
сенсорних мережах»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ТЗ-91

Максименко Ольга Сергіївна _____

Керівник:

професор кафедри ТК НН ІТС, д.т.н., професор,

Лисенко Олександр Іванович _____

Рецензент:

Професор кафедри ІКТС НН ІТС, д.т.н., професор,

Скулиш Марія Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2023 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Максименко Ользі Сергіївні

1. Тема роботи «Вдосконалення алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах», керівник роботи Лисенко Олександр Іванович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «22» травня 2023 р. №1884-с.

2. Термін подання студентом роботи 13 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: актуальність використання алгоритмів маршрутизації мобільних сенсорних мереж, можливість їх адаптації для вирішення широкого спектру завдань та можливість їх вдосконалення

4. Зміст роботи:

1) Мобільні сенсорні мережі.

2) Особливості маршрутизації в мобільних сенсорних мережах.

3) Протоколи маршрутизації в мобільних сенсорних мережах.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

Слайд 1 -Тема, актуальність, мета, задачі.

Слайд 2 – Характеристика, особливості, технічні вимоги та застосування мобільних сенсорних мереж.

Слайди 3-4 – Характерні особливості маршрутизації в МСМ, аналіз параметрів.

Слайди 5-6 – Типи протоколів маршрутизації та їх порівняння, переваги та недоліки.

Слайд 7 – Загальні висновки.

6. Дата видачі завдання 29.11.2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та аналіз інформації відносно вдосконалення алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах	30.11.2022 – 25.12.2023	Виконано
2	Мобільні сенсорні мережі, їх застосування	05.01.2023 – 27.02.2023	Виконано
3	Особливості маршрутизації в мобільних сенсорних мережах	01.03.2023 – 21.04.2023	Виконано
4	Протоколи маршрутизації в мобільних сенсорних мережах	23.04.2023 – 27.05.2023	Виконано
5	Висновки до розділів та оформлення дипломної роботи	28.05.2023 – 30.05.2023	Виконано

Студент

Ольга МАКСИМЕНКО

Керівник

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 59 сторінок, 20 рисунків, 2 таблиці та 29 джерел.

Мета роботи: дослідження особливостей методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах та аналіз сучасних протоколів маршрутизації в МСМ.

В ході виконання даної роботи було розглянуто основні характеристики та вимоги до процесу маршрутизації в мобільних сенсорних мережах. Проаналізовано параметри маршрутизації відповідно до завдань мережі. Також було розроблено класифікацію методів маршрутизації та розглянуто найбільш відомі протоколи маршрутизації. Проведено порівняння цих протоколів та вказано на переваги кожного з них.

Ключові слова: мобільні сенсорні мережі, сенсорні вузли, маршрутизація, ретрансляція повідомлень, доставка даних, балансування навантаження трафіку.

ABSTRACT

The work contains 59 pages, 20 figures, 2 table. 29 sources were used.

Goal: study of features of routing methods in mobile sensor networks and analysis of modern routing protocols in WSN.

In the course of this work, the main characteristics and requirements for the routing process in mobile sensor networks were considered. Routing parameters are analyzed according to network tasks. A classification of routing methods was also developed and the most known routing protocols were considered. These protocols are compared and the advantages of each of them are indicated.

Keywords: wireless sensor networks, sensor nodes, routing, message relaying, data transmission, traffic load balancing.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1	12
Мобільні сенсорні мережі	12
1.1. Загальні відомості	12
1.2. Особливості МСМ.....	14
1.3. Технічні вимоги до МСМ.....	15
1.4. Застосування МСМ	18
Висновки	18
РОЗДІЛ 2	20
ОСОБЛИВОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	20
2.1. Основні задачі та принципи маршрутизації.....	20
2.2. Аналіз параметрів маршрутизації в МСМ.....	23
2.2.1 Кількість проміжних вузлів	23
2.2.2 Енергія.....	24
2.2.3 Надійність.....	28
2.2.4 Якість обслуговування	29
Висновки	33
РОЗДІЛ 3	34
ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	34
3.1. Класифікація протоколів маршрутизації.....	34
3.2. Маршрутизація, орієнтована на дані	36
3.2.1 Протокол SPIN	37
3.2.2. Протокол Directed Diffusion.....	41
3.2.3. Протокол Rumor Routing.....	43
3.2.4. Протокол GBR.....	45
3.2.5 Протокол OLSR.....	45
3.2.6 Протокол AODV	48
3.3 Протокол ієрархічної маршрутизації	50

3.3.1 Протокол LEACH.....	51
3.3.2 Протокол PEGASIS.....	53
3.4 Маршрутизація на основі місцезнаходження	54
3.4.1 Протокол GAF	55
3.4.2 Протокол GEAR	57
3.5 Порівняння протоколів маршрутизації для WSN	58
Висновки	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AODV	(Ad-hoc On-demand Distance Vector) – однорангова дистанційна маршрутизація по вимозі
BER	(BitErrorRate) – коефіцієнт помилкових бітів
WSN	(Wireless Sensor Network) – безпроводова (мобільна) сенсорна мережа
MCM	мобільна сенсорна мережа
CH	(Cluster Head)– голова кластеру
CM	(Cluster Members) – член кластеру
DD	(Directed Diffusion) – спрямована дифузія
GAF	(Geographic Adaptive Fidelity) – географічний адаптивний протокол
GBR	(Gradient-Based Routing) – маршрутизація заснована на градієнтах
GEAR	(Geographic and Energy Aware Routing) – протокол географічної і енергозберігаючої маршрутизації
GPS	(Global Positioning System) – система глобального позиціонування
IP	(Internet Protocol) – мережевий протокол
LEACH	(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) – ієрархічний алгоритм адаптивної кластеризації з низьким рівнем використання енергії
MPR	(Multi-point Relays) – багато точкові ретранслятори
OLSR	(Optimized Link State Routing) – оптимізована маршрутизація за стану каналів зв'язку
PEGASIS	(Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) – протокол енергоефективного збору інформації в сенсорних мережах
QoS	(Quality of Service) – якість обслуговування

RR	(Rumor routing) – маршрутизація за рахунок поширення слухів
RREP	(Route Response) – відповідь маршруту
RREQ	(Route Request) – запит маршруту
SPIN	(Sensor Protocols for Information via Negotiation) – сенсорні протоколи для інформації через переговори
TC	(Topology Control) – контроль за топологією
TDMA	(Time Division Multiple Access) – доступ з розділенням у часі
TTL	(Time To Live) – час життя запиту
БС	базова станція

ВСТУП

Актуальність роботи. В останні роки активний розвиток технологій бездротового зв'язку разом із досягненнями в мікропроцесорній та вимірювальній техніці дозволив побудувати бездротові сенсорні мережі - новий клас систем передачі даних. Бездротові (мобільні) сенсорні мережі (БСМ) - це децентралізовані, самоорганізовані, відмовостійкі мережі з величезною кількістю (до десятків тисяч) електронних автономних вузлів, які можуть обмінюватися і ретранслювати повідомлення через бездротові канали зв'язку.

Мобільні сенсорні мережі ефективно використовуються для вирішення різноманітних завдань, які пов'язані з обробкою, розподіленням збором та аналізом інформації в таких сферах: комплексна автоматизація, промислова автоматизація, моніторинг навколишнього середовища, безпека і оборона і охорона здоров'я, маючи наступні переваги:

- Не потрібно прокладати кабелі для живлення або передачі даних.
- Низькі витрати на встановлення та обслуговування системи.
- Автономні бездротові вузли можуть бути легко розгорнуті в різних місцях простору.
- Мережа може бути встановлена або модифікована на діючих об'єктах з мінімальним втручанням в роботу.
- Надійність і відмовостійкість всієї системи в разі виходу з ладу окремих вузлів або втрати зв'язку між вузлами.

Загалом, мобільні сенсорні мережі - це однорангові мережі, де всі вузли рівноправні, мають автономні джерела живлення і можуть виступати в ролі ретрансляторів інформаційних пакетів. Тому в БСМ вирішальними є наступні задачі:

- Задача пошуку оптимального маршруту. Оптимальний маршрут - це маршрут доставки інформаційних пакетів від вузла, що відправляє пакети до вузла-одержувача, який мінімізує сумарне споживання ресурсів (наприклад, енергії) вузлами, задіяними в цьому маршруті.

- Задача полягає в тому, щоб прокласти маршрут таким чином, щоб час життя мережі був максимальним.

Таким чином, ефективність мобільної сенсорної мережі значною мірою залежить від вибору протоколу маршрутизації пакетів. Неправильний його вибір може призвести до нерівномірного завантаження вузлів, що беруть участь у ретрансляції пакетів, і, як наслідок, до швидкого витрачання цими вузлами заряду батареї.

Отже, вибір правильного методу маршрутизації - один з основних факторів розвитку бездротових сенсорних мереж.

Мета. Метою даної роботи є дослідження та вдосконалення особливостей методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах та аналіз сучасних протоколів маршрутизації в MCM.

Нам необхідно вирішити відповідно такі завдання:

- Вивчення основних особливостей та вимог до MCM.
- Дослідження та класифікація методів маршрутизації у WSN.
- Аналіз основних методів маршрутизації в глобальних мережах.
- Порівняння переваг та недоліків відомих протоколів маршрутизації в MCM.

Об'єкт дослідження – мобільні сенсорні мережі.

Предмет дослідження – способи маршрутизації в MCM.

РОЗДІЛ 1

МОБІЛЬНІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

1.1. Загальні відомості

Останні технологічні досягнення та стрімкий розвиток технологій зробили технічно та економічно можливим виробництво компактних і недорогих датчиків. Чутливі електронні датчики вимірюють умови, пов'язані з навколишнім середовищем, перетворюють дані в електронні сигнали, а також передають зібрані дані бездротовим зв'язком. Таким чином, після обробки цих сигналів, можна отримати інформацію про характеристики об'єктів чи подій, що відбуваються недалеко від датчика. Датчики, які можуть обмінюватися даними по бездротовому зв'язку і контролювати велику територію, у великій кількості разом утворюють єдину мобільну сенсорну мережу [2].

Мобільна сенсорна мережа - це децентралізована мережа, яка є стійкою до виходу з ладу окремих компонентів. При цьому загальна кількість елементів може досягати сотень і десятків тисяч сенсорних вузлів.

Сенсорні вузли обмінюються інформацією не тільки між собою, але й з базовою станцією, яка може надавати зібрані дані для віддаленої обробки, аналізу та зберігання. Вони також мають можливість ретранслювати повідомлення між різними елементами мережі, розширюючи таким чином зону покриття до декількох кілометрів. Таким чином, загальну структурну схему мобільної сенсорної мережі можна представити як дві групи датчиків, що контролюють дві різні ділянки простору і підключені до Інтернету через базову станцію (рис. 1.1).

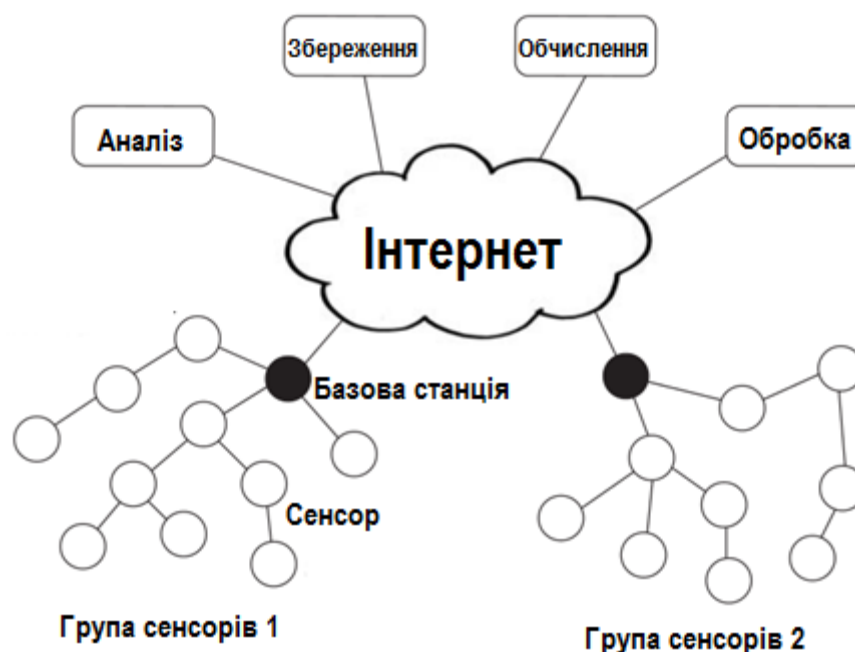


Рис. 1.1 Мобільна сенсорна мережа

Функція сенсорного вузла в WSN може сильно відрізнятися. Як приклад, прості сенсорні вузли можуть контролювати один фізичний параметр, в той час як більш складні датчики можуть використовувати різні методи зондування (акустичні, оптичні, магнітні і т.д.). Ці датчики також мають різні можливості передачі даних і можуть використовувати технології з різною швидкістю передачі даних і затримками, наприклад, ультразвук, інфрачервоний діапазон, радіочастоти тощо. В той самий час прості датчики можуть лише збирати та передавати інформацію, більш потужні пристрої з кращими обчислювальними та енергетичними ресурсами можуть самостійно обробляти та комбінувати дані. Такі пристрої часто забезпечують додаткові функції у WSN, наприклад, формуючи основний канал зв'язку для з'єднання сенсорних вузлів з обмеженими ресурсами з базовою станцією. Деякі пристрої також мають доступ до додаткових допоміжних технологій, таких як системи глобального позиціонування (GPS) для визначення координат вузлів.

Додаткові функції досить часто призводять до надмірного споживання енергії в джерелі живлення. Так як кожен елемент живиться автономно, при

вичерпанні ресурсу живлення елемент буде вимкнений.

Таким чином, однією з основних цілей проектування WSN є обмін даними при одночасному прагненні продовжити термін служби мережі та уникнути деградації зв'язку шляхом вибору методів управління енергоспоживанням за допомогою відповідних методів маршрутизації.

1.2 Особливості MCM

Мобільні сенсорні мережі стикаються з багатьма тими ж проблемами, що й інші розподілені системи, але є деякі важливі відмінності від інших типів бездротових мереж зв'язку, таких як локальні мережі та мобільні епізодичні мережі.

Нижче наведені основні характеристики WSN [1]:

- Великий розмір мережі - кількість вузлів у мережі може досягати десятків тисяч.
- Складна топологія - як правило, мережа має багатостільникову топологію і всі або більшість вузлів є фіксованими.
- Обмеженість ресурсів вузлів - можливості забезпечення автономного живлення, обчислювальної потужності та мікропроцесорної пам'яті, пропускної здатності каналів зв'язку тощо дуже обмежені.
- Тип трафіку - в залежності від поточної прикладної задачі, система підтримує типи трафіку багато-до-одного, один-до-багатьох і багато-до-багатьох.
- Розміщення вузлів - розташування вузлів у просторі є випадковим або детермінованим, а розподіл вузлів у зоні покриття мережі - рівномірним або нерівномірним.
- Саморегулювання та відмовостійкість – ці вузли можуть автономно конфігуруватися для адаптації до умов середовища та режиму роботи, як на етапі розробки системи, так і під час її експлуатації.
- Масштабування - обсяг необхідного службового мережевого трафіку та пам'яті вузлів практично не залежить від загального розміру мережі.

- Модель генерації повідомлень - вузли надсилають пакети за часом (тобто періодично), за подіями або за запитами від зовнішніх приймачів інформації, а також можливі різноманітні комбінації цих варіантів.

- Неоднорідність вузлів і каналів зв'язку - вузли різняться за енергетичними ресурсами, обсягом пам'яті тощо, а радіоканали можуть відрізнятися за швидкістю та відстанню передачі даних, надійністю і т.д.

1.3 Технічні вимоги до МСМ

Мобільна сенсорна мережа є технологією, яка привертає багато уваги завдяки своїм відомим перевагам. Саме це і посприяло швидкому розвитку МСМ. Однак, основною проблемою в розробці бездротових сенсорних систем залишається створення менших, дешевших та ефективніших пристроїв. Проте, ці вимоги створюють серйозні обмеження для багатofункціональності WSN. Малопотужні сенсорні вузли мають дуже низьку обчислювальну потужність, яку можна порівняти з комп'ютерними системами останнього десятиліття. [6]

Більше того, малі розміри та низьке енергоспоживання сенсорів унеможливають інтеграцію багатьох функцій та компонентів, таких як GPS-приймачі.

Сенсорні вузли можуть працювати з обмеженим запасом енергії тому, що зазвичай вони розроблені для роботи від батареї та потребують заміни або підзарядки, коли батарея розряджається. Однак для певних вузлів немає відповідного варіанту. У цьому випадку джерело живлення викидається, як тільки воно вичерпується. По-перше, це не дуже добре впливає на кількість і якість отриманої інформації та ефективність обладнання. По-друге, можливість підзарядки акумулятора також має значний вплив на стратегію енергоспоживання при зборі та передачі інформації [5]. У випадку з одноразовими батареями сенсорні вузли повинні мати можливість працювати до самого закінчення часу сесії або аж до моменту заміни батарей.

Тому першою і, як правило, найважливішою задачею при проектуванні WSN є енергоефективність. Ця вимога відображається в конструкції сенсорних вузлів та мережі загалом.

Мобільні сенсорні мережі часто розгортаються у далеких районах і в важких кліматичних умовах, без потрібної інфраструктури, можливостей обслуговування і ремонту. Це по-перше, негативно впливає на технічний стан обладнання, а по-друге, ускладнює швидкісне відновлення працездатності системи в разі збою.

Так, сенсорні вузли мають бути досить стійкими до зовнішніх факторів впливу та самоорганізовуватися, встановлювати власні параметри, взаємодіяти з характерними вузлами, адаптуватися до несправностей, змін середовища та факторів, що впливають на систему, без належного втручання людини. Це означає, що всі перераховані вище функції повинні виконуватися в автономному режимі. Водночас, ще одною з найважливіших функцій є саме оптимізація, що означає здатність пристрою контролювати та змінювати використання своїх ресурсів [2]. Нарешті, функція самовідновлення дозволяє цим сенсорним вузлам виявляти несправності мережі та реагувати на них. У сенсорній мережі з обмеженим енергоспоживанням всі функції для самоорганізації мають бути спроектовані і реалізовані так, щоб не викликати значного додаткового споживання енергії.

У багатьох мобільних сенсорних мережах велика кількість мережевих елементів та обмеження потужності не завжди покладаються на централізовані топології та алгоритми управління маршрутизацією, які можна застосувати на базових станціях. Натомість сенсорні вузли також мають співпрацювати з сенсорами поруч, щоб приймати локальні рішення, не покладаючись на глобальну інформацію. В результаті, ці децентралізовані алгоритми можуть не бути оптимальними, зате можуть бути більш енергоефективними, ніж централізовані вирішення, завдяки зменшенню обсягу переданої управлінської інформації. Хоча такий підхід досить

негативно впливає на загальну продуктивність системи, він може продовжити термін служби мережі.

Більшість МСМ використовуються для збирання секретної інформації. Однак, оскільки датчики працюють віддалено і автономно, зростає ризик зловмисних атак на мережу. Бездротова передача даних також полегшує викрадення особливої інформації коли передаються дані з датчиків [9]. Як приклад, одна з наймасштабніших загроз для функціональності мережі є такі атаки, які спрямовані на порушення базової роботи сенсорних мереж. Це досягається за допомогою різних атак, але в основному за допомогою сигнальних перешкод, які погіршують якість зв'язку між різними вузлами. Це може мати дуже серйозні наслідки. Існує багато способів запобігання атакам та обмеження їх наслідків для вирішення проблем безпеки в розподілених системах, але багато з них вимагають вагомих ресурсів обчислення. Часто ці вимоги не виконуються через обмеженість у сенсорних вузлів потрібних ресурсів. Внаслідок цього, сенсорні мережі потребують нових рішень, таких як аутентифікація вузлів та шифрування інформації [5].

З вищесказаного можна зробити такий висновок: багато вирішень при розгортанні WSN відрізняються від запропонованих рішень для інших мереж. Існує ще багато питань, які можуть вплинути на проектування сенсорних вузлів і проектування мобільної сенсорної мережі. Так, вибрані датчики можуть встановлюватися в автомобілях або інших мобільних транспортних засобах, а це означає, що топологія мережі буде постійно змінюватися. Така система потребуватиме оперативних налаштувань на різних системних рівнях, таких як маршрутизація (наприклад, зміни в списку сусідів), контроль доступу (наприклад, зайнятість каналу) та агрегація даних. Вузли датчиків потребують більше саме апаратних джерел, якщо їхні завдання вимагають побільше обчислень і зберігання даних. Або якщо вони належним чином відповідають за збирання та обробку даних від багатьох інших датчиків у мережі [10].

1.4 Застосування MCM

Мобільні сенсорні мережі варіюються від рухових датчиків в охоронних установках до систем контролю вологості повітря в бібліотечних стелажах. WSN можуть використовуватися в будь-якій області, де необхідно збирати інформацію про стан об'єкта, явища, середовища або процесу.

WSN широко використовуються в системах моніторингу та захисту приватної інфраструктури, національних електромереж та трубопровідної інфраструктури. Ті мережі, що складаються з тисяч вузлів і датчиків, використовуються для моніторингу величезних природних територій, для прогнозу забруднення навколишнього середовища, для збору інформації про структурну цілісність мостів за допомогою датчиків вібрації, а також для моніторингу використання різноманітних добрив, води і пестицидів для поліпшення здоров'я і врожайності сільськогосподарських культур [7].

WSN широко використовуються в системах "розумного будинку". Ці системи відстежують всі показники в будинку (наприклад, температуру і освітлення) і самостійно приймають рішення про їх зміну відповідно до заздалегідь визначених критеріїв. Крім цього, можливе також дистанційне керування обладнанням, підключеним до цієї системи.

Висновки

Цей розділ містить огляд мобільних сенсорних мереж.

WSN - це розподілена мережа великої кількості сенсорів, з'єднаних між собою бездротовими каналами, стійка до відмов окремих елементів і здатна до самоорганізації; сама зона покриття WSN може становити від кількох метрів до десятків кілометрів, залежно від здатності передавати повідомлення від вузла до вузла.

Було проаналізовано: принципи обміну інформацією між різними вузлами мережі та було розглянуто загальну структурну схему бездротової

сенсорної мережі, характеристики бездротових сенсорних мереж у порівнянні з іншими різними типами розподільовальних мереж.

Головною метою проектування МСМ є обмін даними при спробі продовжити сам термін для служби мережі і уникнути деградації зв'язку. Найефективніший спосіб управління енергоспоживанням є вибір найкращого методу маршрутизації.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Основні задачі та принципи маршрутизації

Зазвичай, дані, які були зібрані за допомогою датчиків в мобільній сенсорній мережі, передаються на базову станцію, яка з'єднує WSN із іншими різними мережами, де дані можуть оброблятися та бути проаналізованими. Маршрутизація – це процес призначення шляху смс від самого джерела аж до приймача через один або кілька ретрансляторів. Він є основною відповідальністю мережевого рівня комунікаційних протоколів.

У невеликих сенсорних мережах, тобто там де датчики можуть бути розташовані досить близько один коло одного, може існувати прямий зв'язок між всіма сенсорними вузлами та базовою станцією. Принцип прямого зв'язку проілюстровано на рисунку 2.1, де всі сенсорні вузли можуть спілкуватися з приймачем без необхідності ретрансляції повідомлень через різні вузли. Це найпростіша реалізація прямого зв'язку, де всі дані досягають цілі за один стрибок.

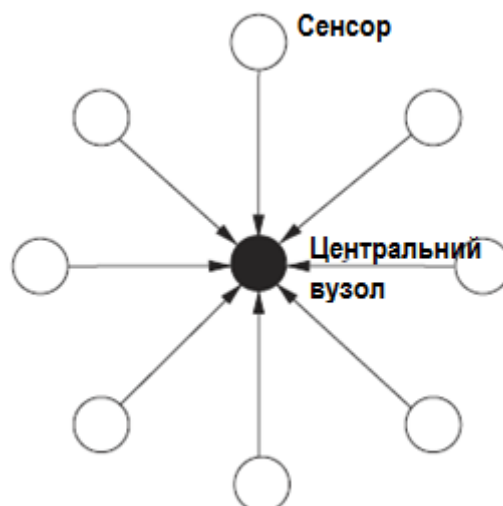


Рис. 2.1 Модель прямого зв'язку

Однак більшість WSN складені з величезної кількості сенсорних вузлів,

що охоплюють велику територію, і тому повинні використовувати непрямий зв'язок (рис. 2.2).

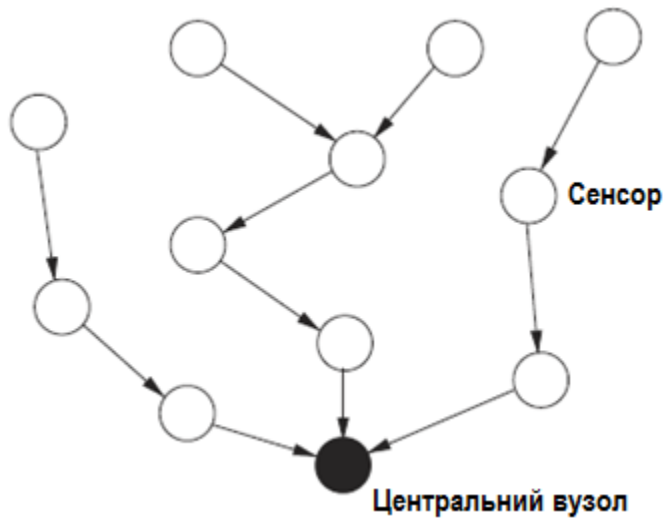


Рис. 2.2 Модель непрямого зв'язку

Це означає, що сенсорні вузли повинні генерувати і передавати власну інформацію, а також й ретранслювати повідомлення від чужих сенсорних вузлів. У цьому випадку визначальним завданням на рівні мережі для усіх сенсорних вузлів є визначення шляху від датчика до приймача за допомогою низки інших чужих сенсорних вузлів, які виступають у ролі проміжних вузлів [3].

Такі методи маршрутизації протоколів пов'язані з труднощами через унікальні характеристики WSN, такі як нестача ресурсів і ненадійність бездротового середовища. Наприклад, обмежені можливості обробки, зберігання даних, пропускної здатності та енергоспоживання вимагають легких рішень для маршрутизації, в той час як потенційні зміни в топології мережі вимагають адаптивних і змінних рішень для маршрутизації.

Якщо вузли WSN розгортаються детерміновано (тобто в певних заздалегідь відомих місцях). Для зв'язку між цими вузлами і базовою станцією використовуються заздалегідь визначені шляхи маршрутизації. Однак, якщо вузли розміщені випадковим чином, топологія мережі неоднорідна і не може бути передбачена заздалегідь. Тоді основним

завданням цих вузлів є самоорганізація, це означає, що вони повинні визначати своє положення в просторі, знаходити своїх сусідів і співпрацювати, щоб знайти легкий шлях до базової станції [11].

Одним з найважливіших параметрів МСМ є час життя мережі. Він визначається як час роботи мережі до першої відмови одного з таких вузлів через вичерпання автономного простого джерела живлення.

Оскільки вузли на часто використовуваному оптимальному шляху будуть ретранслювати пакети частіше, простий пошук найдешевшого шляху може призвести до розподілу мережевого навантаження нерівномірно між вузлами мережі,. В результаті можуть утворюватися вузли, які одночасно ретранслюють великі обсяги інформації. Збільшення навантаження на вузли через появу таких вузлів призводить до виникнення проблем з пропускнуою здатністю і передчасному вичерпанню енергетичних ресурсів стільника.

Отже, для забезпечення високої продуктивності і довговічності всієї мережі необхідне балансування навантаження. Це означає, що ресурси (особливо енергія) можуть використовуватися більш рівномірно за рахунок розподілу напрямків трафіку між вузлами [13]. Тому завданням пошуку маршруту з балансування навантаженням є оптимізація енергоспоживання всієї мережі, замість кожного окремого маршруту.

Таким чином, в мобільних сенсорних мережах розрізняють дві задачі маршрутизації і критерії знаходження маршруту різні:

- Задача пошуку оптимального шляху - оптимальний шлях - це шлях передачі інформаційних пакетів від вузла, що відправляє до вузла-одержувача і сумарне споживання ресурсів вузлів на цьому шляху повинно бути мінімальним.

- Задача маршрутизації для максимізації часу життя мережі.

2.2 Аналіз параметрів маршрутизації в МСМ

Залежно від свого призначення, мобільні сенсорні мережі суттєво відрізняються за своїми обмеженнями та характеристиками, що необхідно враховувати при розробці протоколів маршрутизації. Як приклад, більшість МСМ мають обмеження щодо енергетичних ресурсів, продуктивності та обсягу пам'яті. Сенсорні мережі також можуть значно відрізнятися за розміром і географічною зоною покриття [12]. Глобальні схеми адресації можуть іноді недоступними бути або недоречними, особливо в мережах з гетерогенними або мобільними вузлами.

Залежно від інформації, яка призначена, дані з датчиків можна збирати різними способами. У системах, що базуються на часі, вузли регулярно передають зібрані дані одержувачам; у системах, що базуються на подіях (наприклад, виявлення катастрофічних пожеж), вузли повідомляють зібрану інформацію лише тоді, коли відбувається бажана подія. Також, в схемах на основі запитів одержувач надсилає запити на збір даних і збирає дані з датчиків тільки тоді, коли це необхідно.

Таким чином, налаштування маршрутизації можуть використовуватися для характеристики різних цілей протоколів маршрутизації разом із врахуванням використання тих ресурсів. Далі ми розглянемо найбільш важливі параметри і також всі необхідні критерії розробки систем маршрутизації.

2.2.1 Кількість проміжних вузлів

Найбільш часто використовуваною метрикою в протоколах маршрутизації є мінімальна кількість переходів (або найкоротший шлях), що означає, що протокол маршрутизації шукає шлях з найменшою кількістю проміжних вузлів від відправника до одержувача. У даному алгоритмі кожне з'єднання має особливу вартість і протокол вибирає такий шлях, який мінімізує загальну вартість поширення даних від джерела до місця

призначення.

Головна думка такої метрики полягає в тому, що використання найкоротшого шляху призведе до скорочення часу передачі і меншого споживання ресурсів, оскільки задіяно менше вузлів-відправників. Проте, цей підхід не враховує фактичну доступність ресурсів на кожному вузлі, тому результуючі маршрути, як правило, є менш оптимальними з точки зору затримки енергії та уникнення заторів. В більшості бездротових сенсорних мережах може знадобитися використання вузлів з різноманітними апаратними можливостями, такими як потужність, ємність джерела енергії, пропускна здатність і відстань передачі [16].

Тим не менш, метрика мінімального переходу використовується в багатьох протоколах маршрутизації через її простоту і практичність.

2.2.2 Енергія

Важливим аспектом маршрутизації у WSN, безсумнівно, є енергоефективність. Зазвичай, серед елементів вузла найбільше енергії споживає приймач, тому основним способом зниження середнього енергоспоживання вузла є мінімізація його активності в радіоканалі (відправлення та отримання даних, прослуховування каналу). Оскільки кожен вузол є не тільки відправником або ж отримувачем інформації, але і ретранслює проміжні пакети в міру необхідності, оптимізація обсягу і напрямку потоку трафіку є дуже важливим завданням рівня маршрутизації [1][17].

Не існує єдиної енергетичної метрики, яку можна було б застосувати до проблем маршрутизації. Енергоефективність можна інтерпретувати по-різному, але важливим є поняття мінімізації споживання енергії на пакет. Це найпростіша концепція енергоефективності, метою якої є мінімізація загальної кількості енергії, що використовується для просування пакета від джерела до місця призначення. Загальна енергія - це загальна кількість

енергії, спожита кожним вузлом на шляху отримання і передачі пакетів. На рисунку 2.2.3 показано приклад невеликої сенсорної мережі, де вузол-джерело хоче надіслати пакет до вузла-одержувача, використовуючи шлях, який мінімізує енерговитрати пакета. Числа на кожному каналі вказують на вартість розповсюдження пакета в цьому напрямку. В результаті, пакет відправляється через вузли А - D - G із загальною вартістю 5. Цей маршрут відрізняється від варіанту використання маршруту мінімального переходу (В - G).

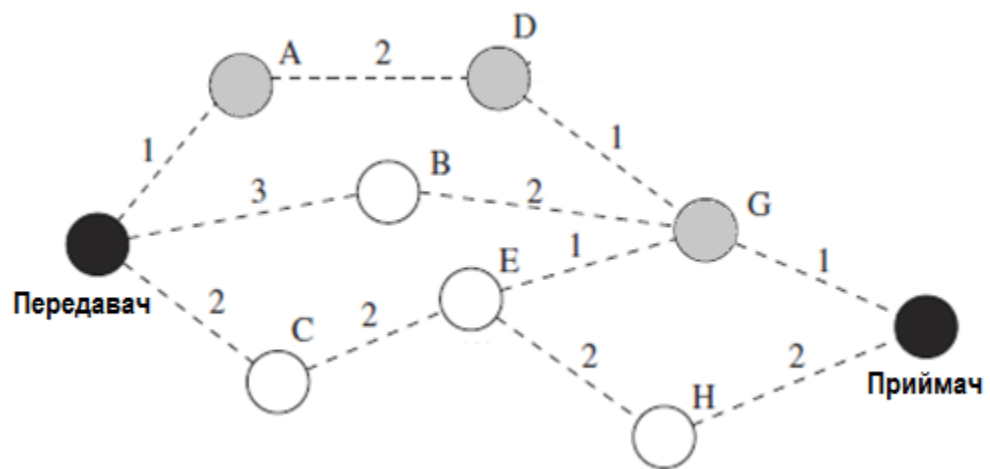


Рис. 2.3 Вибір маршруту з мінімальними витратами енергії на пакет

Сама концепція максимального терміну поділу мережі - це поділ всієї мережі на багато менших підмереж. Він відбувається тоді, коли останній вузол, що з'єднує 2 частини мережі і виходить з ладу. В результаті підмережі стають недоступними і робота сенсорних вузлів в цих підмережах може бути змарнована. Тому завдання полягає в тому, аби зменшити енергоспоживання критичних вузлів, щоб підтримувати мережу, в якій до кожного сенсорного вузла можна дістатися принаймні одним шляхом. Наприклад, мінімальний набір вузлів, видалення яких фрагментує мережу, можна визначити за допомогою теорем про максимальний потік та мінімальне відсікання. Протокол маршрутизації може спробувати збалансувати навантаження на мережу після визначення цих критичних вузлів. На рис. 2.4 вузол D є критичним вузлом. Наприклад, якщо батарея цього вузла розрядиться, вузли

F, I і J стануть недоступними для інших вузлів мережі.

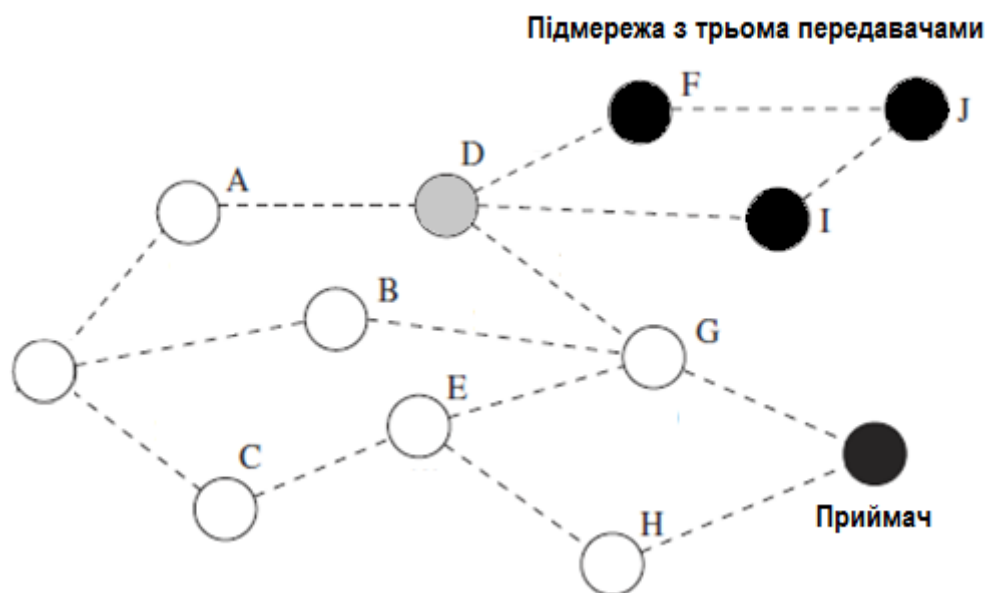


Рис. 2.4 Вибір маршруту на основі критерію максимального часу розділення мережі

Коли використовується концепція найменшої різниці між рівнями потужності вузлів, а ще всі вузли мережі можуть вважатися однаково важливими, і мета полягає в тому, аби розподілити споживання енергії якомога рівномірніше між усіма вузлами мережі. Метою цього підходу є максимізація терміну служби всієї мережі. Наприклад, мета полягає в тому, щоб якомога довше підтримувати роботу більшої кількості вузлів, а не в тому, щоб постійно зменшувати розмір мережі, вичерпуючи ресурси одних вузлів швидше, ніж інших. В ідеалі, всі вузли мали б померти одночасно, але такий сценарій нездійсненний [1].

Для визначення середнього споживання енергії використовується метод. У цьому методі енергоємність вузла (поточний базових рівень заряду батареї) є ключовим моментом, а не енергетичні витрати на розповсюдження пакетів. Протоколи маршрутизації, що використовують цю метрику, прокладають шлях з найвищою загальною енергоємністю вузла від джерела до пункту призначення [8]. На рисунку 2.5 число під вузлом вказує на

енергоємність вузла. У цьому прикладі протокол маршрутизації може вибрати маршрут С - Е - Н з найвищою загальною енергоємністю. Протоколи маршрутизації, що використовують цю метрику, повинні бути ретельно розроблені, щоб уникнути ризику вибору занадто довгих маршрутів для максимізації загальної енергоефективності. Варіація цієї метрики може уникнути цієї проблеми, максимізуючи середню енергоефективність.

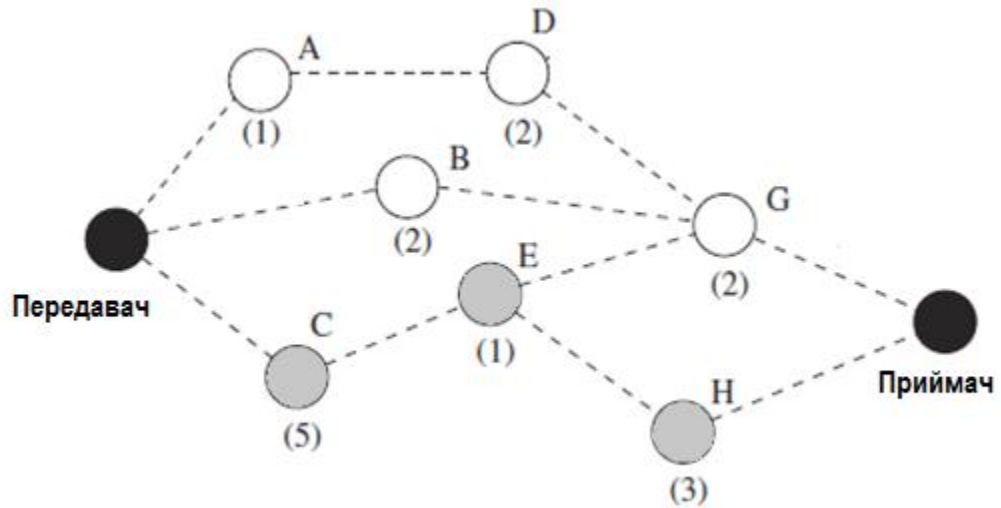


Рис. 2.5 Вибір маршруту на основі середньої енергоємності

За принципом максимуму-мінімуму енергії основною метою маршрутизації є вибір шляху з найбільшою мінімальною енергоємністю, а не максимізація енергоємності вздовж маршруту. Цей метод не тільки допомагає маршрутам з високою енергоємністю, але й захищає вузли з низьким енергоспоживанням від передчасного вичерпання енергії. На рисунку 2.6 протокол, що використовує цю метрику, обирає шлях В - G. Це пов'язано з тим, що мінімальна потужність цього шляху дорівнює 2, що вже є більше, ніж сама мінімальна потужність всіх вузлів на інших можливих шляхах.

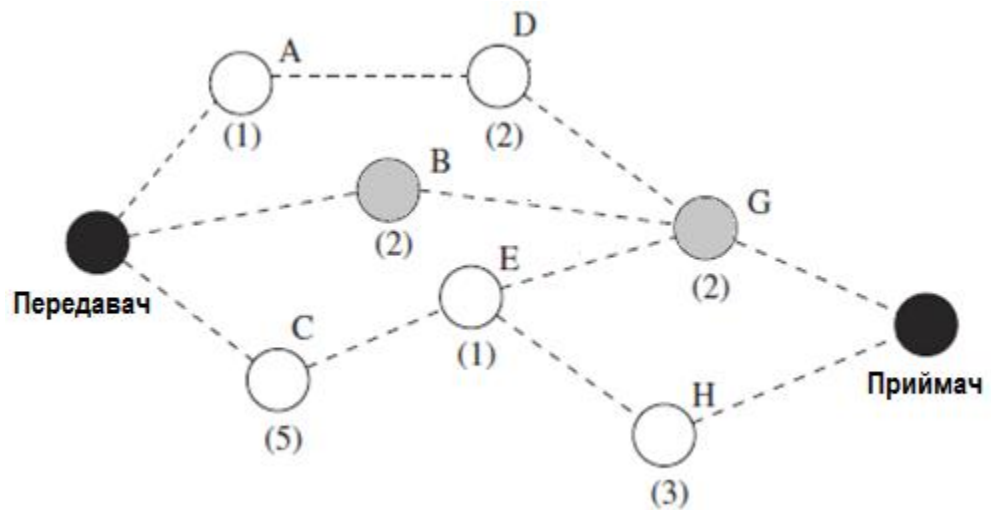


Рис. 2.6 Вибір шляху з найбільшим мінімальним енергоспоживанням

Ці різні формулювання способів покращення енергозбереження призводять до дуже різних реалізацій протоколів з різними результатами та витратами. Наприклад, вартість отримання та відправлення пакетів може залежати від розміру пакета для визначення мінімальної енергії, що споживається кожним пакетом. З іншого боку, оскільки енергетична потужність змінюється з часом, протоколи маршрутизації, які використовують метрики на основі потужності, повинні періодично оновлювати ці дані [1][18].

2.2.3 Надійність.

Очікується, що умови експлуатації WSN будуть складними, що може призвести до відмов вузлів та розривів зв'язку між вузлами. Тому, щоб забезпечити високу надійність всієї системи, система маршрутизації повинна автоматично генерувати нові маршрути в обхід заблокованих вузлів і витрачати якомога менше ресурсів на реконфігурацію маршруту.

У багатьох системах обирається маршрут, який залишається стабільним протягом тривалого періоду часу. Для цього вузол буде змінюватись і оцінювати якість свого каналу порівняно з сусідами та обирати своїх сусідів для наступного переходу, таким чином збільшуючи ймовірність передачі успішно. Протокол маршрутизації може визначити кілька шляхів

для найкоротшого переходу і вибрати шлях, який гарантує найкращу якість серед усіх шляхів. Також, у мережах з мобільними вузлами протоколи маршрутизації можуть використовувати метрику довговічності з'єднання, яка вимірює, наскільки доступним буде з'єднання в майбутньому. Ця метрика може бути використана для вибору більш надійних маршрутів і фіксованих вузлів.

2.2.4 Якість обслуговування

"Якість обслуговування" (QoS) стосується певних показників продуктивності мережі, таких як затримка пакетів, пропускна здатність рівня і частота помилок.

Вибір метрик QoS певним чином залежний від типу програми. Наприклад, сенсорні мережі, які виявляють і відстежують цілі, вимагають низької затримки для термінових сенсорних даних, в той час як мережі з великим обсягом даних (мультимедійні сенсорні мережі) - вимагають високої пропускної здатності [19].

Якщо спосіб маршрутизації вибирає найкращий шлях передачі даних з точки зору певної метрики QoS, він покладається на набір налаштування стану всіх вузлів і також каналів зв'язку, щоб зробити це судження. Оскільки ці параметри відображають поточний стан розподілу трафіку в мережі, їх аналіз дозволяє вибрати відповідні шляхи передачі даних, наприклад, щоб уникнути перевантаження трафіку в мережі або мінімізувати затримки передачі пакетів.

Під мережевими ресурсами в буквальному сенсі розуміють будь-які ресурси, що споживаються для виконання таких завдань, як пошук відповідних маршрутів, створення і підтримка сеансів передачі даних і ведення таблиць маршрутизації. Розрізняють такі категорії мережеских ресурсів

Мережеві ресурси, необхідні для належної якості маршрутизації:

- Процесорний час. Хоча мобільні пристрої з кожним роком оснащуються все більш потужними процесорами, вони все ще мають обмежену обчислювальну потужність і не можуть конкурувати з традиційними настільними комп'ютерами. Однак це найважливіший фактор, оскільки методи маршрутизації зазвичай не навантажують центральний процесор.

- Розмір буфера пакетів вузла. Під час роботи мережі неминуче виникає ситуація, коли багато вузлів можуть надсилати пакети даних одночасно або коли шлях до певного вузла не знайдено і пакет необхідно тимчасово помістити в буфер. Коли буфер буде повністю заповнений, всі отримані пакети будуть відкинуті, що збільшує частоту відкинутих пакетів.

- Пропускна здатність каналу зв'язку. Зазвичай вимірюється в бітах в секунду і безпосередньо вказує на швидкість і затримку передачі даних. Однак, оскільки багато вузлів використовують канал зв'язку одночасно, частка пропускної здатності, яку отримує кожен вузол, повинна бути виражена в якійсь формі. Спосіб вираження цієї частки залежить від методу доступу до середовища передачі. При конкурентному методі доступу немає гарантії, що кожен вузол може отримати доступ до каналу в потрібний час, оскільки інші вузли можуть почати передавати дані в той самий час. Тому той доступ до середовища передачі може надаватися лише з окремою ймовірністю. Однак більшість схем маршрутизації припускають, що доступ до окремого середовища передачі наданий на конкурентній основі.

При цьому використовуються такі показники:

- Середня затримка передачі пакетів. Визначається як час між передачею пакета від вузла і його отриманням вузлом призначення в часі роботи всієї мережі.

- Рівень втрат пакетів у мережі. Вимірюється як відсоток втрачених пакетів від загальної кількості переданих пакетів за весь час роботи мережі.

- Заповнюваність сеансу вхідних даних. Визначається у відсотках. Встановлення сеансу може бути відхилено, якщо схема маршрутизації не може знайти відповідний шлях для передачі даних з урахуванням якості обслуговування. Цей показник показує відсоток успішно прийнятих сесій. Його значення свідчить про ефективність методу маршрутизації та якість зв'язку. Очевидно, що цей показник не застосовується до методів, які намагаються поліпшити параметри якості обслуговування в мережі [1].

- Відсоток успішних сесій. Визначається у відсотках. Показує, який відсоток заявок було успішно оброблено після того, як метод маршрутизації створив сеанс передачі даних. Ця метрика може бути більш важливою з точки зору кінцевого користувача, ніж відсоток прийнятих сеансів передачі даних.

- Загальна пропускна здатність мережі. Обсяг даних, що передається всією мережею за одиницю часу.

- Продуктивність вузла. Середня швидкість передачі даних, досягнута вузлом мережі під час роботи. Система маршрутизації повинна визначати поточну пропускну здатність каналу зв'язку і оцінювати його відповідність цьому параметру.

- Затримка пошуку шляху. Стандартний середній час, що пройшов з моменту запиту вузла на встановлення сеансу зв'язку до моменту, вже коли протокол встановить цей сеанс зв'язку.

- Енергоефективність протоколу маршрутизації, що визначається як кількість енергії батареї, витраченої на обробку і передачу пакета.

- Нормалізоване навантаження маршрутизації. Воно визначає відношення пакетів керування маршрутизацією до загальної кількості пакетів даних. Ця метрика дозволяє оцінювати витрати на маршрутизацію (наприклад, передачу керуючих повідомлень).

- Час відновлення шляху. Ця метрика показує час, що пройшов з моменту відмови або припинення роботи одного із проміжних вузлів маршруту до моменту, де протокол маршрутизації вже встановить шлях перенаправлення для цієї сесії. Зазвичай він визначає стійкість протоколу маршрутизації до порушень у мережі та його здатність розподіляти навантаження [10].

При розгортанні МСМ потрібно знайти середній баланс між реалізацією якості обслуговування для конкретного додатку і загальною енергоефективністю мережі.

При проектуванні систем маршрутизації для бездротових сенсорних мереж розробникам часто доводиться вибирати між декількома варіантами, в залежності від завдань мережі і додатків. Наприклад, важливо вибирати між продуктивністю мережі і затримкою передачі пакетів; в WSN ці фактори є взаємовиключними. Нижчі вимоги до затримування передачі пакетів можуть збільшити спільний обсяг трафіку, який передається мережею, збільшуючи розмір пакетів і зв'язуючи більше каналів зв'язку. В якості альтернативи, якщо програма взагалі не має обмежень на затримку передачі пакетів, можна використовувати наступний алгоритм маршрутизації Джерела можуть розділяти пакети з одного сеансу і надсилати їх до різних сусідніх вузлів. Ці вузли надсилають збережені пакети до вузла призначення, коли вони вступають у прямий контакт з вузлом призначення. Розділення маршрутів дозволяє досягти високої щільності передачі даних, але пакети можуть надходити з великими затримками. Альтернативною стратегією є одночасне надсилання пакетів кількома маршрутами, щоб зменшити затримку доставки. Однак цей метод знижує загальну ефективність використання пропускну здатності мережі, оскільки пакет надсилається кілька разів. Звичайно, цей метод також призводить до збільшення споживання енергії на передачу повідомлень.

Тому, з погляду проектування бездротових датчиків, мета оптимізації

маршрутизації - задоволення якомога більшої кількості потреб користувачів, тобто покращення якості обслуговування мережі в цілому або окремих сеансів передачі даних.

Висновки

У другому розділі розглядалась маршрутизація мобільних сенсорних мереж, а саме основні варіанти зв'язку між вузлами мережі.

Ефективність мобільної сенсорної мережі в деяких моментах визначається у виборі протоколів маршрутизації пакетів: наприклад, при проектуванні МСМ слід докласти зусиль для зменшення і також для вирівнювання навантаження на вузли, чого можна досягти за допомогою протоколів маршрутизації.

Маршрутизація має 2 основні задачі:

- Задача пошуку оптимального маршруту.
- Задача пошуку найкращого маршруту і завдання маршрутизації, що максимізує час життя мережі.

Залежно від свого призначення, розміру та технічних характеристик, мобільні сенсорні мережі сильно відрізняються за своїми обмеженнями та характеристиками, які необхідно враховувати при розробці протоколів маршрутизації. Для характеристики пропускної здатності протоколу маршрутизації, з урахуванням споживання ресурсів, вимог до потужності і продуктивності обладнання, використовуються такі основні показники: енергоефективність, кількість вузлів, надійність, належна якість обслуговування [8][21].

При розробці МСМ головним завданням є оптимізації ресурсів для знаходження балансу між покращенням ключових параметрів та загальною енергоефективністю мережі.

РОЗДІЛ 3

ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

3.1. Класифікація протоколів маршрутизації

Існує декілька способів класифікації протоколів маршрутизації. На рисунку 3.1 показано класифікацію протоколів маршрутизації на основі організації мережі.



Рис. 3.1 Класифікація протоколів за способом організації мережі

Значна кількість протоколів маршрутизації класифікуються в одну з трьох категорій. Багаторівневі протоколи маршрутизації припускають, що всі вузли мають еквівалентні функції та ролі. Це означає, що деякі вузли можуть пересилати дані від імені інших вузлів, тоді як інші можуть лише генерувати та розповсюджувати дані, отримані від власних датчиків. Протоколи маршрутизації на основі місцезнаходження покладаються на місцезнаходження інформації, отриманої від вузлів, для визначення подальшої маршрутизації.

Протоколи маршрутизації відповідають за визначення та/або пошук шляху від відправника до бажаного місця призначення. Цей процес може використовуватися для розрізнення різних типів протоколів маршрутизації. На Рисунку 3.3.2 показано класифікацію методів маршрутизації відповідно до того, як виявляються маршрути.

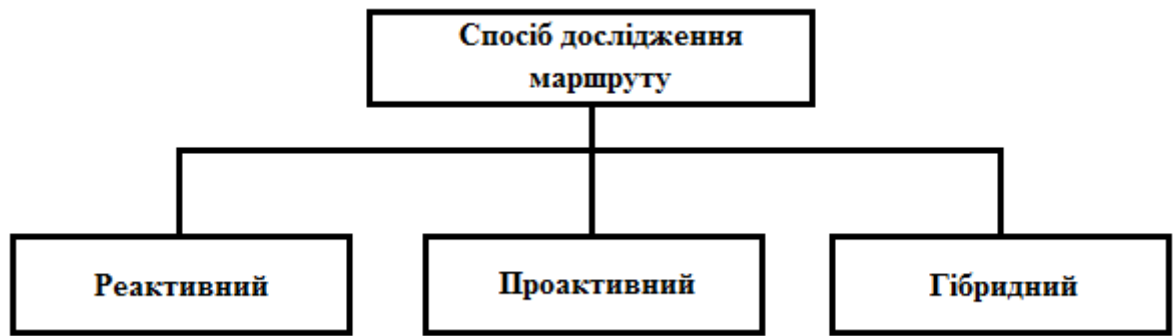


Рис. 3.2 Класифікація протоколів за способом дослідження маршруту

Як наприклад, реактивні протоколи ще можуть створювати маршрути на вимогу. Це означає, що маршрут може бути створений щоразу, тоді коли відправник планує надіслати дані одержувачу, але ще не має чітко встановленого маршруту. Реактивне визначення маршруту спричиняє затримку перед відправленням даних, але протоколи проактивної маршрутизації можуть створювати маршрути до того, як вони стануть потрібними. Деякі протоколи мають характеристики як реактивних, так і проактивних протоколів і саме тому класифікуються як гібридні протоколи маршрутизації.

Нарешті, протоколи маршрутизації також відрізняються за своєю функціональністю (Рисунок 3.3).



Рис. 3.3 Класифікація протоколів за принципом роботи

Наприклад, мета протоколів на основі переговорів - зменшити надлишкову передачу даних, покладаючись на обмін заздалегідь узгодженими повідомленнями між сусідніми сенсорними вузлами перед

фактичною передачею даних; протоколи SPIN належать до даної категорії. Багатошляхові протоколи досягають високої продуктивності та відмовостійкості завдяки використанню декількох шляхів одночасно. У протоколах маршрутизації на основі запиту сенсорні вузли передають ці дані після того, як запит був отриманий від вузла-одержувача.

Мета протоколів маршрутизації QoS - забезпечити такі показники якості обслуговування: затримка, низьке енергоспоживання і низька втрата пакетів. Дані протоколи маршрутизації ще відрізняються також тим, як саме вони підтримують цю обробку даних у мережі. Когерентні протоколи перед відправкою даних виконують лише мінімальну обробку (наприклад, дедуплікацію, таймаут тощо). Однак у непослідовних протоколах деякі вузли виконуватимуть значну обробку локально, перш ніж пересилати вихідні дані на інші вузли для подальшої обробки [21].

Багато протоколів маршрутизації зосереджені на одноадресній маршрутизації, тобто спрямуванні даних датчиків до конкретного приймача. З іншого боку, багатоадресна або ширококомовна маршрутизація розподіляє дані між кількома вузлами.

3.2. Маршрутизація, орієнтована на дані

Перший клас протоколів маршрутизації - це протоколи з плоскою організацією мережі.

Щоб створити ряд методів маршрутизації, специфічних для WSN, враховуються наступні характеристики: Вузли WSN виконують однаковий набір функцій і взаємодіють один з одним для виконання однієї задачі збору даних з різних сенсорів. Наприклад, якщо сенсорний вузол вимірює фізичні параметри навколишнього середовища, недоцільно передавати дані з кожного вузла на базову станцію, оскільки сусідні вузли, швидше за все, фіксують ті ж самі значення. Тому пропонується нова концепція маршрутизації, яка називається маршрутизацією на основі даних.

Маршрутизація на основі даних фокусується на пошуку та надсиланні інформації, описаної певними типами та атрибутами, а не на зборі даних з окремих датчиків. Базові станції надсилають запити в певні області в межах зони покриття мережі, вказуючи, яка інформація або події їх цікавлять. Вузли, розташовані в цих зонах, після збору необхідної інформації або запису даних про потрібні події, обмінюються локально доступними даними один з одним і відправляють на базову станцію тільки одне повідомлення із загальним індексом, щоб підвищити надійність і зменшити надлишковість. Цей принцип дозволяє значно зменшити обсяг трафіку в мережі і, таким чином, знизити споживання енергії. Поширеними прикладами такого підходу є протоколи SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) та DD (Directed Diffusion) [18].

Область застосування методів маршрутизації на основі даних обмежена мережами з трафіком "багато до одного" і може розглядатися як нішеве рішення для розподілених мереж збору даних з високою надмірністю сенсорних вузлів. Тому цей метод не підходить для використання в тимчасових мережах з трафіком багато-до-багатьох або в системах, де повідомлення кожного вузла є критично важливими.

3.2.1 Протокол SPIN

SPIN - це група протоколів для доставки даних, заснованих на "переговорному" процесі. Він відноситься до однорангового методу маршрутизації без гарантії доставки повідомлень і враховує енергоспоживання вузлів. Він підходить для мереж WSN з динамічною топологією і мобільних вузлів. Використовується кастомізована версія методу простого затоплення, що набагато збільшує ефективність маршрутизації порівняно з прототипом. Сусідні вузли перевіряються наперед передачі даних, щоб уникнути помилкових повідомлень. Повідомлення з кожного такого вузла розподіляються по повній мережі, так що інформація може бути отримана з якогось вузла на вимогу, що дозволяє здійснювати

негайну доставку в досить простий спосіб.

Механізм взаємодії базується на трьох типах повідомлень [19]:

- ADV - для оновлення інформації.
- REQ - для запиту даних.
- DATA - для передачі самих даних.

Принцип роботи цього алгоритму складається з трьох фаз (рис. 3.4). Коли вузол отримує нові дані, він виконує початкові "переговори", надсилаючи повідомлення ADV своєму сусіду і чекаючи на повідомлення REQ; після отримання повідомлення ADV вузол-одержувач перевіряє, чи були отримані дані. Якщо вони не були отримані, вузол-одержувач відповідає запитом на передачу даних за допомогою службового повідомлення REQ; після отримання REQ вузол-відправник надсилає зібрані дані (повідомлення DATA). Кожен сусідній вузол, який отримує нові дані, веде переговори зі своїми сусідами в такий самий спосіб і надсилає ці дані тим сусіднім вузлам, які зацікавлені в цих даних, тобто тим, які їх не отримали і мають можливість передати їх далі по мережі. Як показано на рисунку 3.4, на повідомлення ADV відповідають лише ті вузли, які ще не мають копії оголошених даних. Крім того, вузли В і D, отримавши повідомлення DATA від А, можуть об'єднати ці дані зі своїми власними і відправити зібрані дані своїм сусідам.

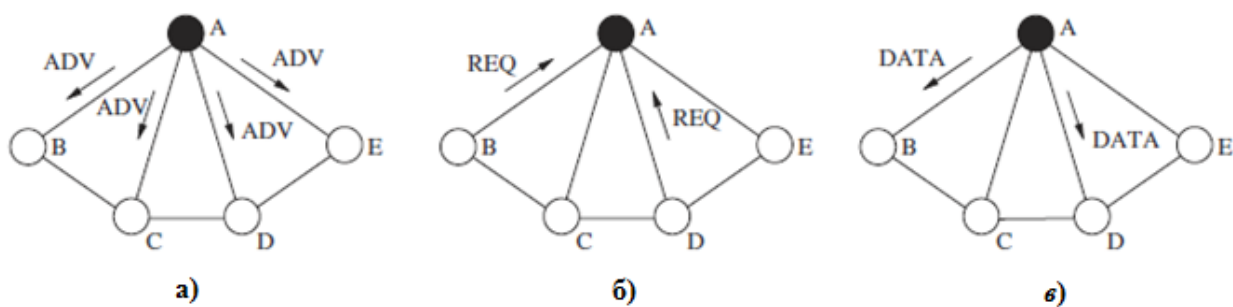


Рис. 3.4 Алгоритм протоколу SPIN: а - фаза повідомлення, б - фаза запиту, в - передача інформації

Метадані - це як ідентифікатор для фактичних даних, на основі якого вузли можуть уникнути повторної передачі одних і тих же даних. Це зменшує надмірність мережевого трафіку і витрачає менше енергії в порівнянні з традиційними схемами лавинної маршрутизації.

Основними протоколами, що належать до сімейства SPIN, є

- SPIN-PP.

- SPIN-BC.

- SPIN-EC.

- SPIN-RL.

Протокол SPIN-EC є модифікованою версією базового протоколу SPIN-PP. Основною відмінністю є введення контролю енергії. Поки всі вузли мають достатню кількість енергії, вони беруть участь у трифазному алгоритмі SPIN-PP. Однак, коли енергія вузла наближається до певного низького рівня, він не буде брати активної участі в протоколі. Іншими словами, вузол буде брати участь у всіх трьох фазах тільки в тому випадку, якщо є гарантія, що це не призведе до вичерпання енергії. Таким чином, вузол буде відповідати на повідомлення тільки в тому випадку, якщо у нього достатньо енергії для того, щоб зробити запит і отримати запитувані дані. Крім цього, вузол почне обмінюватися даними із сусідами, тільки коли він впевнений, що зможе завершити протокол, навіть якщо всі його сусідні вузли запросять точну копію даних.

Протокол SPIN-BC зазвичай покращує всі попередні протоколи, використовуючи дані характеристики широкомовної передачі даних. При цій широкомовній передачі кожне смс від відправника приймається всіма вузлами в радіусі дії радіохвиль відправника.

SPIN-BC використовує недорогу схему зв'язку "один-до-багатьох", яка дозволяє вузлам перехоплювати всі операції в межах свого радіусу дії, забезпечуючи таким чином ефективну координацію і використання ресурсів

SPIN-BC використовує триступеневий обмін повідомленнями - ADV, REQ і DATA - з трьома основними відмінностями в порівнянні з алгоритмом SPIN-PP:

- Всі повідомлення є широкомовними, що означає, що всі вузли в межах діапазону мовлення відправника отримують копію повідомлення.

- При отриманні ADV-повідомлення вузол перевіряє, чи хоче він отримати копію рекламованих даних, і якщо хоче, то випадковим чином встановлює таймер. Тільки після закінчення таймера вузол надсилає REQ-повідомлення на широкомовну адресу. Якщо вузол прочитає REQ-повідомлення до того, як закінчиться його власний таймер, то вузол-відправник скасує свій власний таймер і не буде надсилати власне REQ-повідомлення. Випадкові таймери необхідні для того, щоб уникнути колізій між повідомленнями REQ від різних сусідів і дозволити вузлу не надсилати REQ, якщо інший вузол вже надіслав REQ.

- Вузол-відправник надсилає запит даних на адресу відправника лише один раз. Це означає, що дублікати REQ-повідомлень на одні й ті ж дані будуть ігноруватися.

Останній варіант - протокол SPIN-RL, який є вдосконаленням SPIN-BC і забезпечує асиметричний зв'язок. Спочатку кожен вузол продовжує отримувати повідомлення REQ, і якщо він не отримує відповідне повідомлення DATA протягом певного періоду часу, він буде вважати, що не було отримано жодного повідомлення REQ або DATA. У цьому випадку вузол надсилає повідомлення REQ для повторного запиту даних і вказує в заголовку повідомлення ідентифікатор випадково обраного вузла серед вузлів, які раніше оголошували дані. Крім того, SPIN-RL обмежує частоту передачі повідомлень DATA. Це означає, що після того, як вузол відправив повідомлення DATA, він чекає фіксовану кількість часу, перш ніж відповісти на інший запит тих же даних.

Головною перевагою протоколу SPIN є його простота. Це пояснюється тим, що все, що потрібно знати вузлу - це те, що його найближчий сусід

знаходиться на відстані одного хопу. Протокол розроблений для зменшення втрат в середовищах з симетричними зв'язками. Вузли можуть компенсувати втрату повідомлень ADV шляхом періодичної ретрансляції запитів про наявність даних, а для втрачених повідомлень REQ і DATA - шляхом повторного запиту, якщо протягом певного інтервалу часу дані не були отримані.

3.2.2. Протокол DirectedDiffusion

Основна ідея алгоритму DD полягає в тому, що вузли запитують дані, надсилаючи запити до іменованих повідомлень. Ця цікава розробка формує в мережі градієнт, який використовується для спрямування даних датчиків до приймача, а проміжні вузли на шляху даних можуть об'єднувати дані з різних джерел, щоб усунути надмірність і зменшити кількість передавань.

Протокол DD не покладається на глобальні ідентифікатори вузлів, а використовує пари атрибут-значення для опису операцій зчитування та управління процесом маршрутизації.

Кожен вузол має локальний кеш запитів, в якому зберігається інформація про стан активних запитів. Для кожного запиту кеш зберігає додаткові дані, такі як мітки часу, тобто значення таймера, які фіксують час отримання запиту, градієнти до кожного сусіднього вузла із зазначенням значення обміну, часу життя та часу життя. Градієнт вказує на певний можливий напрямок маршрутизації і може мати власну вагу, яка може використовуватися відповідно до конкретних вимог маршрутизації. Ця описана структура кешу запитів забезпечує основу для оптимальної маршрутизації [22].

Рисунок 3.5 ілюструє спосіб передачі смс за допомогою протоколу DD. Вузол-одержувач спочатку передає повідомлення, яке вказує на те, що він готовий до прийому даних. Між вузлом-одержувачем і сусідніми вузлами встановлюється градієнт і створюється маршрут. Алгоритм пересилання

повідомлень створює спеціальні правила, які мають на меті підтримувати вміст кешу в стані, який є актуальним під час обробки вхідних запитів. Запити з центрального вузла повторюються періодично, щоб забезпечити надійну доставку і роботу всієї системи маршрутизації в разі збою в мережі [3].

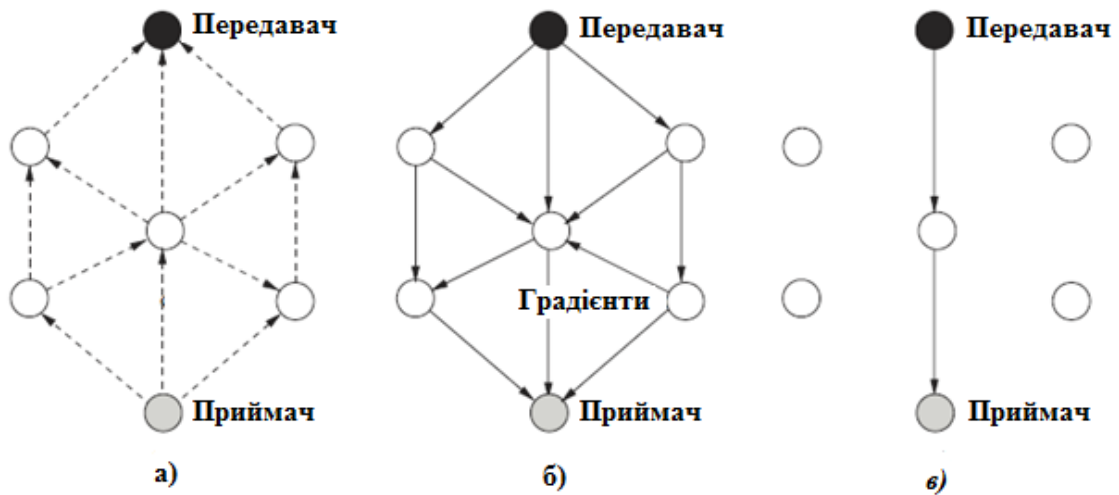


Рис. 3.5 Протокол DD: а – розповсюдження зацікавленості, б – встановлення градієнтів, в – передача даних

Коли відбувається подія, що цікавить центральний вузол, повідомлення надсилається назад із джерела інформації до вузла, що по центрі. Повідомлення також можуть надсилатися з постійною частотою протягом усього часу існування цього запиту. Дані, що надсилаються у відповідь, використовують ті самі пари атрибут-значення, що і запит. Для ретрансляції також використовується той самий набір інформації, який вказує найкращий напрямок передачі для кожного конкретного вузла. В результаті вибирається найбільш підходящий шлях для потоку повідомлень на основі визначених критеріїв маршрутизації (наприклад, найкоротший або мінімальне споживання енергії).

На відміну від SPIN, протокол DD не рекламується самим джерелом, як у SPIN, а приймач надсилає запити на вимогу. Оскільки вся комунікація відбувається між сусідами, не потрібна схема адресації, і кожен вузол може агрегувати і зберігати дані датчиків, зменшуючи таким чином споживання

енергії [22].

Недоліком цього протоколу є те, що він не підходить для систем, які потребують безперервної передачі даних.

3.2.3. Протокол Rumor Routing

Маршрутизація за чутками (Rumour Routing) - це варіант попереднього алгоритму DD. Він оптимізує схему маршрутизації для мереж з невеликою кількістю подій, але великою кількістю запитів: в алгоритмі маршрутизації RR кожен вузол веде список сусідніх вузлів і таблицю з інформацією про них.

Коли відбувається подія, інформація про неї вставляється в таблицю і генерується спеціальне повідомлення, яке називається "агент", що містить локальну інформацію про подію. Агент є постійним пакетом, який надсилається через мережу для поширення інформації про дану подію і інші важливі події, що відбуваються на його шляху, до цих віддалених вузлів. Отримавши повідомлення, віддалений вузол оновлює таблицю цих подій і розсилає агента по сусіднім вузлам, поки не закінчиться його час життя (TTL).

На рис. 3.6 таблиця вузла А містить таку інформацію про події E1 та E2 до прибуття агента з вузла Е. Коли агент прибуває до вузла А (за допомогою вузла G), А виявляє, що він може отримати дані з вузла Е за допомоги сусіда G, використовуючи коротший шлях, ніж той, який наразі зберігається в таблиці. І тому вузол А може оновлювати свою таблицю інформацією від агента Е.

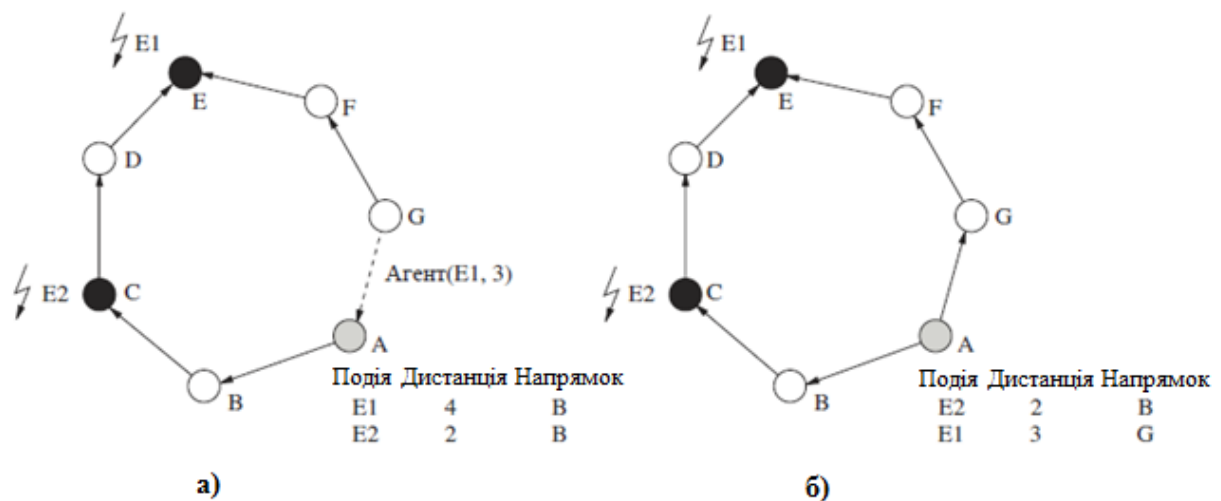


Рис. 3.6 Протокол RR: а – маршрутизація до прибуття агенту, б – після прибуття агенту

Тому, якщо вузол хоче відправити запит на конкретну подію, він для початку перевіряє: існує маршрут до потрібного вузла чи ні. Якщо маршрут є, він пересилає запит до сусідніх вузлів, перелічених у таблиці подій. Якщо інформація про шлях відсутня, випадковим чином вибирається сусідній вузол і запит пересилається до нього. Цей процес продовжується на кожному з вузлів, і повідомлення про запит містить список останніх задіяних вузлів, щоб уникнути повторних передач. Вузол може не знати напрямку до запитуваного вузла, але завдяки маршрутизації до випадкових сусідніх вузлів, запит може досягти вузла, який має доступ до інформації про потрібну подію [23].

Загалом, методи RR-маршрутизації намагаються знайти такий компроміс між запитами та переповненням подій. Алгоритм маршрутизації може використовувати підхід на основі певних запитів, але замість того, щоб переповнювати всю мережу, він зв'язується лише з вузлами, які спостерігали певні події. Окрім цього, розмір таблиць вузлів збільшується зі збільшенням кількості оброблених подій, що робить витрати на зберігання і підтримку таких таблиць проблемою в мережах, де велика кількість подій [3][7].

3.2.4. Протокол GBR

Gradient-based routing (GBR) - це метод маршрутизації на основі градієнта; це ще одна модифікація алгоритму спрямованої дифузії. Ця модифікація має кілька важливих відмінностей. В такому процесі поширення запитів від центрального вузла до решти мережі ще враховується кількість таких ретрансляцій від одного вузла до іншого (кількість хопів). Кожен вузол обчислює параметр, який називається "висота вузла", що вказує на мінімальну кількість стрибків у ланцюжку шляхів від цього вузла до центрального вузла. Для кожного напрямку, що прилягає до вузла, відображається градієнт, який є різницею між висотою цього вузла та сусідніх вузлів. Для прокладання маршруту обирається напрямок з найбільшим значенням градієнта. Якщо градієнти різних напрямків однакові, то напрямок вибирається випадковим чином.

Описаний вище метод маршрутизації може бути доповнений правилами, що враховують економію енергії. Наприклад, якщо поточний запас енергії вузла падає нижче певного значення, він може автоматично збільшити свою "висоту", щоб зменшити навантаження з боку інших вузлів. Сусідні вузли аналізують, що використовувати цей вузол для надсилання повідомлень стає все менш ефективно, тому вони припиняють використовувати такий напрямок і обирають більш оптимальний маршрут. Цей механізм забезпечує якісну адаптивність алгоритму з точки зору балансування та оптимізації енергопостачання.

Окрім того, такий алгоритм забезпечує баланс напруги на трафік, аналізуючи існуючі маршрути. Це означає, що для нових потоків маршрути створюються таким чином, щоб вони містили лише вузли, які не беруть ніякої участі в другорядних маршрутах.

3.2.5 Протокол OLSR

Протокол Optimized Link State Routing (OLSR) - це протокол

проактивної маршрутизації для мобільних сенсорних мереж. Цей протокол належить до протоколів проактивної маршрутизації. Це означає, що маршрути створюються ще до того, як вони стануть необхідними. Маршрут до самого вузла призначення завжди підготовлений. Принцип цього протоколу в тому, щоб зменшити кількість повідомлень про передачу в мережі, відправляючи повідомлення тільки через спеціалізовані вузли, вузли багатоточкового ретранслятора (Multipoint Relay, MPR) [15].

Ідея полягає в тому, щоб мінімізувати розповсюдження широкомовних повідомлень за рахунок зменшення кількості надлишкових повідомлень, що надсилаються в одній і тій же області. Кожен вузол мережі вибирає набір сусідніх вузлів, які відповідають за відправку пакетів з сусідніх вузлів в межах одного хопу. Вони називаються багатоточковими ретрансляторами. Інші сусідні вузли, які не належать до набору багатоточкових повторювачів, читають і обробляють пакети від певного вузла, але не передають їх далі. Вузол MPR для кожного хост-вузла вибирається таким чином, щоб покрити всі сусідні вузли в радіусі двох кроків від хост-вузла; чим менший MPR, тим менше керуючих повідомлень потрібно надсилати [17].

Протокол OLSR покладається на обраний багатоточковий ретранслятор для маршрутизації пакетів і керуючих повідомлень і обчислює маршрути до всіх вузлів призначення через цей MPR. Для цього кожен вузол зберігає інформацію про ряд сусідніх вузлів, які були обрані в якості MPR. Протокол OLSR використовує два типи керуючих повідомлень. Вузол надсилає періодичні повідомлення "Hello", щоб повідомити, хто є його сусідами, які потім можуть приймати і виявляти сигнали від своїх сусідів; повідомлення "Hello" поширюються на всі сусідні вузли, але несусідні вузли більше не надсилають жодних повідомлень.

Так, повідомлення "Привіт" дозволяє кожному вузлу знати сусідні вузли в радіусі двох кроків. А на цій основі інформації вузол обирає багатоточковий ретранслятор. Багатоточковий ретранслятор позначається

спеціальним статусом у повідомленні "Привіт", так що кожний вузол також знає, хто був обраний в якості багатоточкового ретранслятора. Далі вузол може записувати адресу сусіднього вузла або ж список вузлів в межах двох хопів, до яких можна дістатися через цей вузол, і маркер, який вказує, чи є цей вузол багатоточковим ретранслятором в інформаційній таблиці найближчого сусіда, чи ні. Кожен запис у таблиці має свій час актуальності; принцип роботи протоколу OLSR проілюстровано на рисунку 3.7.

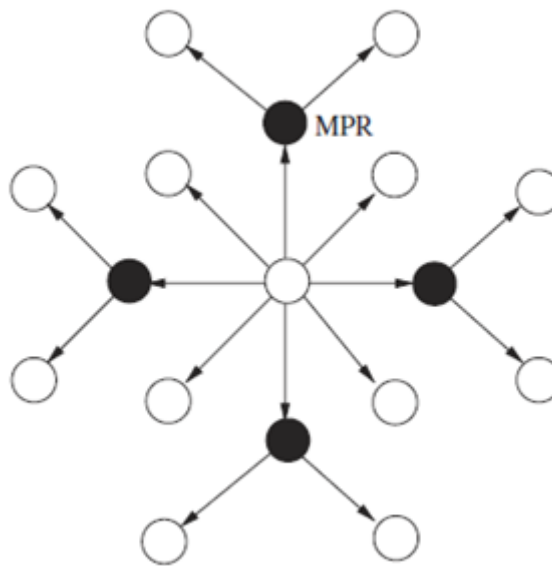


Рис .3.7 Протокол OLSR

Для підтримки даної маршрутизації пакетів кожен вузол також надсилає другий тип керуючих повідомлень: контроль топології (ТС). Повідомлення ТС періодично надсилаються кожним вузлом, щоб повідомити, які вузли вибрали певні вузли як MPR. Ця інформація допомагає вузлам створювати топологію мережі та таблицю маршрутизації. Інформація з таблиці маршрутизації дозволяє протоколу OLSR розрахувати шлях передачі даних. При цьому, єдиний показник для оцінки маршруту - кількість проміжних вузлів.

Незаперечною перевагою цього протоколу є те, що маршрути можна створювати безпосередньо, оскільки кожен вузол завжди підтримує таблицю маршрутизації з маршрутами до кожного вузла мережі. Проте, це збільшує

трафік, що генерується для передачі керуючих смс, а також збільшує ріст вимог до пам'яті вузлів. Основним недоліком цього протоколу є те, що маршрут завжди проходить через вузол MPR, що рідко є найкращим маршрутом з точки зору навантаження. Крім того, якщо вузол на маршруті виходить з ладу, іншим вузлам потрібен час, щоб дізнатися про це з керуючих повідомлень [25].

3.2.6 Протокол AODV

Протокол Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) - це протокол проактивної маршрутизації для бездротових сенсорних мереж зі зв'язком на вимогу. Процес пошуку відповідного маршруту ініціюється після того, як був надісланий запит від хост-вузла. Маршрути зберігаються в таблиці маршрутизації до тих пір, поки вони потрібні.

AODV використовує цикл запит-відповідь для генерації маршрутів. Коли додаток робить запит на відправку даних на вузол, який ще не має маршруту в своїй таблиці, він видає запит на виявлення маршруту. Вузол, який отримує цей пакет, ретранслює його далі, записуючи шлях до вузла-відправника через вузол, який отримав початковий циклічний запит, у свою таблицю маршрутизації. Таким чином, вузли пересилають запити один одному до тих пір, поки запит не досягне вузла призначення, дізнаючись по дорозі шлях до джерела [26]. Якщо один з проміжних вузлів вже знає шлях до вузла призначення, він надсилає повідомлення-відповідь вузлу-відправнику, щоб припинити пересилання запиту.

Як тільки вузол призначення отримає запит, він надішле відповідь вузлу-відправнику. Всі проміжні вузли вже знають шлях до джерела, тому вони пересилають пакети тільки відповідно до записаного шляху. При цьому шлях до вузла призначення записується через вузол, який отримав цей пакет-відповідь. Таким чином, коли запит надсилається від вузла-джерела до вузла-одержувача і коли відповідь надсилається від вузла-одержувача до вузла-

джерела, проміжні вузли одночасно записують шлях до вузла-одержувача через свої сусідні вузли. Коли відповідь надходить на вузол-відправник, всі проміжні маршрутизатори вже знають шлях для двонаправленої передачі даних. У цьому випадку вузол-відправник може отримати кілька відповідей. Буде обрано маршрут з найменшою кількістю проміжних вузлів.

Для зменшення обсягу керуючих повідомлень в протоколі AODV використовується спеціальний лічильник [19]. Кожному запиту присвоюється порядковий номер, і проміжні вузли використовують цей номер для ідентифікації подальших запитів, що надсилаються.

Обмін повідомленнями в протоколі AODV проілюстровано на рисунку 3.8. Для моніторингу та ідентифікації сусідніх вузлів надсилаються повідомлення RREQ (маршрут-запит). Коли від сусіднього вузла надходить відповідне повідомлення RREP (відповідь на маршрут), дані маршрутизуються по найкращому шляху між вузлами-джерелом та вузлом призначення.

Щоб зменшити обсяг керуючих повідомлень, протокол AODV використовує спеціальний лічильник. Кожному запиту присвоюється порядковий номер, і проміжні вузли використовують цей номер для ідентифікації наступних надісланих запитів.

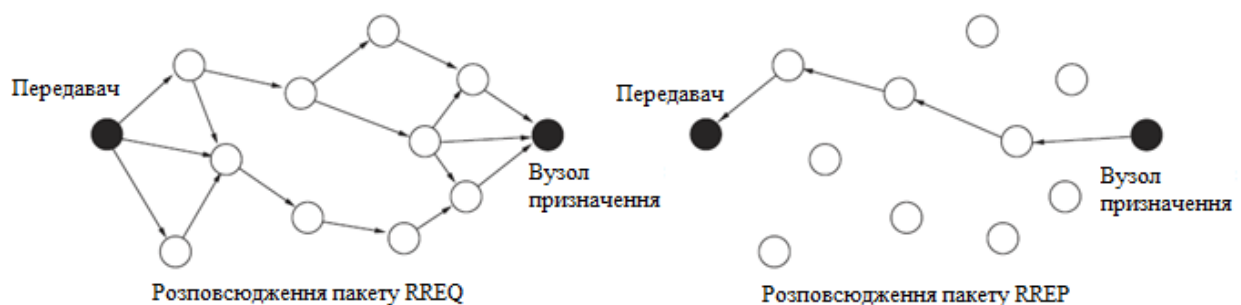


Рис. 3.8 Обмін повідомлень в протоколі AODV

Однією з найважливіших переваг AODV є те, що цей протокол не генерує додатковий трафік, коли не відбувається передача даних. Однак, протокол AODV має деякі суттєві недоліки. По-перше, якщо маршрут зазнає невдачі (наприклад, якщо вузол призначення вже більше не є доступним),

один з вузлів повинен ініціювати видалення маршруту з таблиць маршрутизації всіх проміжних вузлів. В результаті може передаватися застаріла маршрутна інформація [20].

Крім того, оскільки для виявлення таких дублікатів керуючих повідомлень використовуються порядкові номери, а кожен вузол має вести особливу таблицю для того, щоб зберігати набір нещодавно переглянутих номерів. Нарешті, оптимальний шлях оцінюється за кількістю проміжних вузлів.

3.3 Протокол ієрархічної маршрутизації

Протоколи ієрархічної маршрутизації об'єднують вузли у кластери для підвищення масштабованості та ефективності мережі. Головна суть ієрархічної маршрутизації в тому, що сенсорні вузли безпосередньо зв'язуються лише з головою кластера, яка є головним вузлом їхнього кластера.

Ці кластерні головки можуть бути ще більш потужними і ще менш енергоємними пристроями, ніж традиційні сенсорні вузли, які відповідають за пересилання даних датчиків до приймачів. Такий підхід дозволяє значно зменшити кількість комунікацій і навантаження на такі сенсорні вузли, коли кластерні головки можуть витримувати більші навантаження, ніж традиційні сенсорні вузли.

Варіанти кластеризації проілюстровано на рисунку 3.9. У першому випадку всі головки кластера безпосередньо зв'язуються з вузлом-приймачем; у другому сценарії, коли головки кластера не зв'язуються безпосередньо разом із приймачем, а протокол маршрутизації на основі кластера повинен забезпечити створення багатокрокового багатоступеневого етапу [1].

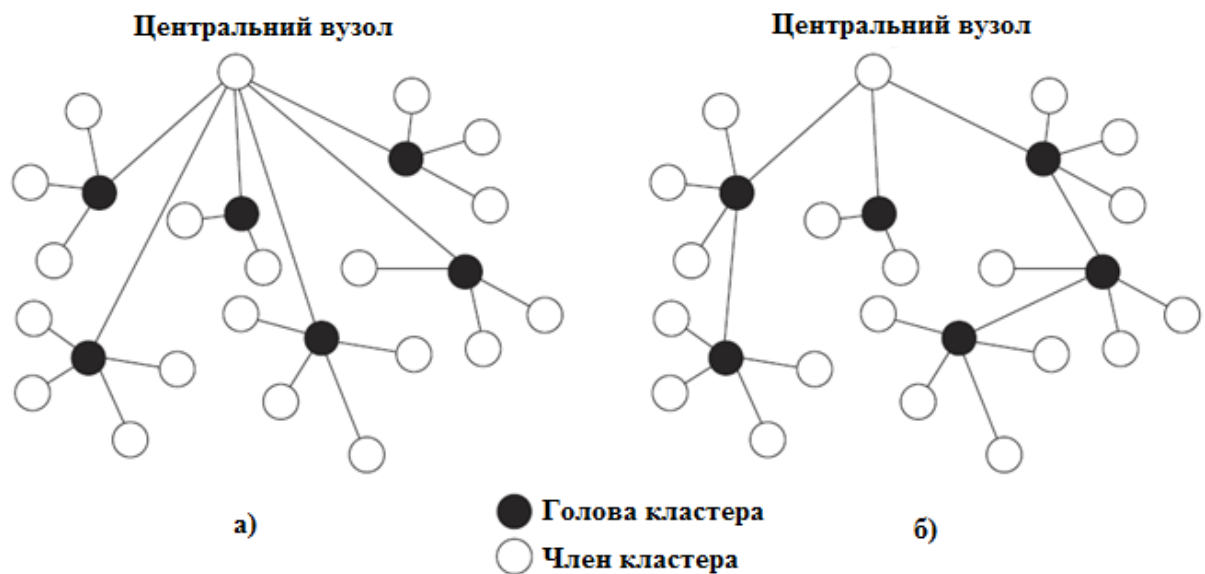


Рис. 3.9 Способи кластеризації: а – з прямим зв’язком голів кластерів з центральним вузлом, б – мультихоповий зв’язок голів кластерів з центральним вузлом

Складність роботи у протоколів ієрархічної маршрутизації - у виборі голови кластера, формуванні кластера та адаптації до динамічності мережі. Порівняно з плоскими підходами до маршрутизації, саме ієрархічні вирішення можуть кількість конфліктів у бездротових середовищах зменшити, а окрім цього, ще й полегшити робочий цикл сенсорних вузлів і підвищити енергоефективність. Кластеризація також полегшує процес маршрутизації, але може призвести до збільшення довжини маршрутів.

Крім того, кластеризація полегшує агрегацію даних датчиків у мережі, оскільки дані з сусідніх датчиків з більшою ймовірністю потрапляють до однієї і тієї ж вершини кластера.

Таким чином, ієрархічна маршрутизація підтримує всі типи трафіку в WSN, але доставка пакетів не є оптимально маршрутизованою і існує додаткова вартість ресурсів для налаштування ієрархічної структури мережі [1].

3.3.1 Протокол LEACH

Протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) належить

до класу ієрархічних методів маршрутизації для балансування енергетичного навантаження. LEACH є стандартним протоколом ієрархічної маршрутизації і тому включає в себе основні принципи алгоритмів ієрархічної маршрутизації.

Сусідні вузли в одній зоні радіодоступу далі об'єднуються в групи, які є незалежними комунікаційними групами. Кластер складається із звичайного підлеглого вузла (member of the cluster - CM) і головного вузла (cluster head - CH), який виконує функцію маршрутизації для інших вузлів у кластері. Кілька основних вузлів утворюють певну основу комунікаційної інфраструктури мережі. Взаємодія всередині кластера здійснюється безпосередньо між загальними вузлами та головою кластера, яка потім надсилає повідомлення від імені голови кластера іншим вузлам кластера (рис. 3.10). Оскільки функція маршрутизації, покладена на голову кластера, інтенсивно споживає енергію для ретрансляції повідомлень з усіх вузлів кластера, голови кластерів обираються випадковим чином, а головні вузли періодично змінюються, щоб забезпечити рівномірне навантаження на всі вузли мережі. Голови кластерів обираються випадковим чином, а головні вузли періодично змінюються. Кількість голів кластера зазвичай становить 5% від загальної кількості вузлів у кластері [25].

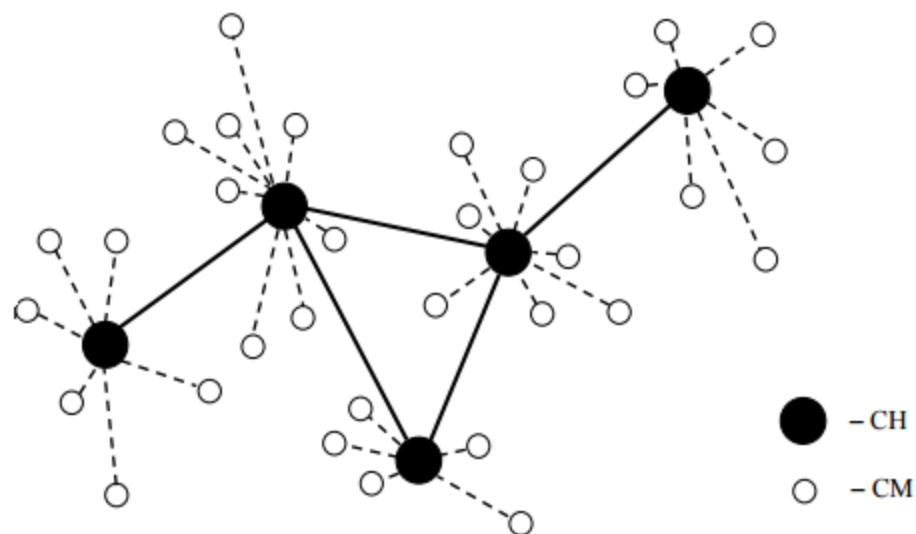


Рис. 3.10 Протокол LEACH

Маршрутизація відбувається у два етапи. Спочатку кінцеві вузли надсилають пакети на голову кластера, яка виконує агрегацію даних і надсилає результати безпосередньо на базову станцію, таким чином значно зменшуючи обсяг трафіку, який може генеруватися. Подальша економія енергії досягається за рахунок використання внутрішньокластерного доступу через тимчасове розділення каналів, створене головою кластера. Потім використовується кодове розділення каналів для зменшення колізій між кластерами.

Однак протокол LEACH має кілька недоліків [17]:

- 1) він передбачає, що обрані головні вузли кластера можуть передавати дані безпосередньо на базову станцію, що неможливо в багатьох практичних ситуацій через коротку відстань каналів радіозв'язку;
- 2) рандомний вибір головних вузлів не є гарантією рівномірного розподілу в мережі, тому в певному радіусі можуть бути кінцеві вузли, які не мають головних вузлів кластера;
- 3) накладні витрати на періодичне формування кластерів знижують ефективність використання енергоефективних методів.

3.3.2 Протокол PEGASIS

Протокол PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) - це протокол енергоефективного збору інформації у бездротових сенсорних мережах. Він є оптимізованою версією ланцюгового протоколу LEACH [18].

Головна різниця протоколу PEGASIS від протоколу LEACH у тому, що кожен вузол обмінюється пакетами зі своїми сусідами, які в свою чергу відповідають за відправку пакетів на базову станцію. Для цього вузли організовані в ланцюжки за допомогою жадібного алгоритму, який починається, наприклад, з певного вузла або базової станції, яка передає інформацію ланцюжка іншим вузлам в сітці. Дані можуть бути об'єднані з

іншими даними, які будуть відправлені на базову станцію під час обробки по ланцюжку. Цей протокол передбачає, що всі вузли можуть спілкуватися з базовою станцією.

Використання протоколу PEGASIS значно збільшує термін служби кожного вузла: термін служби мережі, що використовує протокол PEGASIS, вдвічі перевищує термін служби аналогічної мережі, що використовує протокол LEACH; а іноді досягає високої енергоефективності, оскільки використовується в якості передавача до базової станції. Це дозволяє вузлу зменшити потужність передачі до мінімуму, необхідного для зв'язку з сусідами по ланцюжку.

Недоліком PEGASIS є те, що пакети можуть передаватися зі значними затримками, особливо якщо вони передаються з віддалених вузлів ланцюга.

3.4 Маршрутизація на основі місцезнаходження

Принцип маршрутизації за місцезнаходженням - у використанні інформації про розташування вузлів у просторі для маршрутизації пакетів. На кожному кроці процесу маршрутизації поточний вузол вибирає серед сусідніх вузлів найближчий до вузла призначення і пересилає йому пакет даних; відстань між двома вузлами обчислюється на основі їх координат за допомогою певної метрики. Процес мінімізації відстані має тривати безперервно, аж поки пакет не досягне вузла призначення або поки в околицях поточного вузла не з'явиться вузол, розташований ближче до вузла призначення [29].

В одноадресній маршрутизації на основі місцезнаходження пакети надсилаються безпосередньо до одного вузла призначення, визначеного за його місцезнаходженням. Це означає, що відправник повинен знати не тільки своє місцезнаходження, але й місцезнаходження одержувача. Це місцезнаходження можна отримати за запитом (тобто можна зробити запит, щоб отримати відповідь від місця призначення) або за допомогою брокера місцезнаходження (тобто сервісу, який зіставляє ідентифікатор вузла з його

місцезнаходженням). Підходи широкомовної або багатоадресної маршрутизації, засновані на інформації про місцезнаходження вузла, вимагають надсилання одного і того ж пакета в декількох напрямках. Щоб мінімізувати споживання ресурсів за рахунок зменшення надлишкових з'єднань, протоколи багатоадресної розсилки використовують інформацію про місцезнаходження пункту призначення [29].

Ідентифікація сенсорного вузла зазвичай менш важлива, ніж його місцезнаходження, тобто він може надсилати дані на всі вузли в межах певної географічної області. Такий підхід може бути використаний для поширення запитів у певній зоні інтересу, замість того, щоб поширювати запити по всій мережі, що може значно зменшити пропускну здатність та енергетичні вимоги вузлів. Як тільки пакет досягає потрібної зони, він повинен бути розподілений між усіма вузлами мережі.

Основною перевагою алгоритмів маршрутизації на основі визначення місцезнаходження є їх висока масштабованість. Вузлам потрібно лише зберігати інформацію про географічне розташування своїх сусідів в межах одного хопу, оскільки їм не потрібно підтримувати таблиці маршрутизації або створювати маршрути між усіма вузлами, оскільки накладні витрати не залежать від загальної кількості вузлів у мережі. Тому, на відміну від інших типів мереж, геометричний принцип маршрутизації вважається найбільш перспективним методом для маршрутизації "багато до багатьох" у великих WSN, де ресурси вузлів дуже обмежені [27].

Хоча геометрична маршрутизація не гарантує строго оптимальний маршрут, на практиці ж, знайдені маршрути дуже наближені до найкращого маршруту, а один з критеріїв ефективності - ступінь близькості, що досягається при цьому.

3.4.1 Протокол GAF

Протокол Geographic Adaptive Fidelity (GAF) – є ще одним з прикладів енергоефективного протоколу маршрутизації на основі місцезнаходження.

Однак, він перш за все призначений для мобільних мереж [24].

Територія мережі поділяється на віртуальні сітки, в кожній з яких лише один пристрій може бути широкомовним вузлом у якийсь момент часу. Також цей вузол відповідає за передачу даних на базову станцію, тоді, коли всі інші вузли можуть перебувати у стані очікування. Крім того, протокол GAF передбачає, що для двох сусідніх блоків А і В всі вузли в блоці А можуть обмінюватися даними з усіма вузлами в блоці В і навпаки (рис. 3.11). Розміри та квадранти мережі можуть бути визначені заздалегідь, і кожен вузол (якщо він знає своє місцезнаходження) може визначити, до якого квадранту він належить. Це значить, що більшість вузлів у сітці є сусідами у всіх цих напрямках [3].

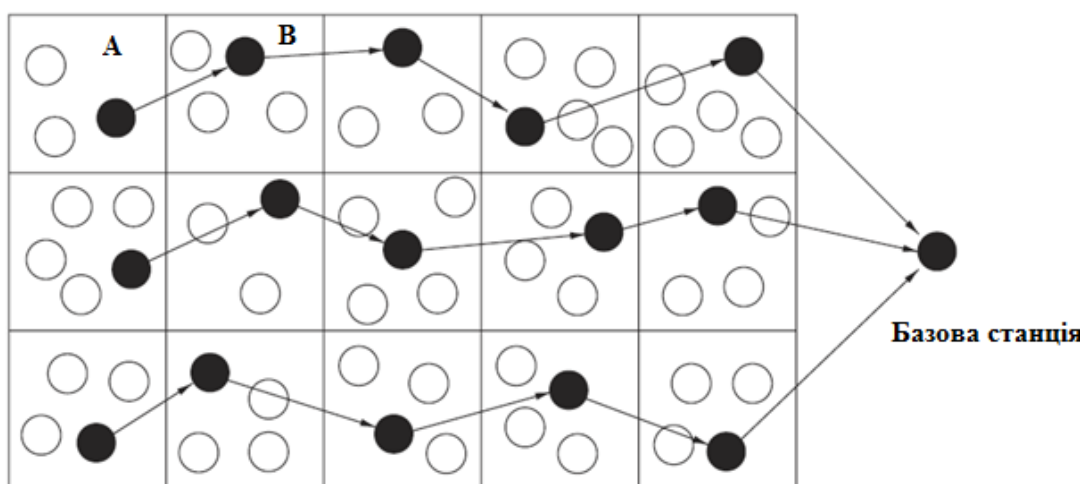


Рис. 3.11 Принцип віртуальної сітки в протоколі GAF

Вузли в GAF передають дані в 3 різних станах. Кожен вузол входить у стан виявлення, де вузол слухає повідомлення від другорядних вузлів у своїй області. Ще він ставить таймер на конкретний проміжок часу, і коли таймер закінчується, вузол надсилає смс про виявлення і переходить в активний діючий стан. Далі цей вузол знову переходить у стан виявлення, як тільки закінчується другий таймер, використовуючи інший таймер. Коли вже вузол перебуває в діючому стані, він періодами повторно надсилає повідомлення про виявлення і переходить у стан виявлення. Окрім того, вузол може різко перейти у стан очікування, якщо вирішить, що другорядний вузол може

впоратися із передачею пакетів. Це може бути досягнуто, наприклад, за допомогою процедури переговорів, заснованої на очікуваному часі життя вузла. Вузол в діючому стані виграє в процесі переговорів більше, ніж вузол у стані виявлення. Вузли у стані очікування періодично повертаються до стану виявлення і повторюють процес передачі даних [1][3].

Таким чином, алгоритм GAF допомагає вузлам тимчасово переходити в стан очікування, тим самим зменшуючи споживання енергії мережі.

3.4.2 Протокол GEAR

Протокол Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) - приклад протоколу на основі визначення місцезнаходження, який передає пакети тільки в межах певної цільової області.

Протокол GEAR розділяє процес передачі даних на два етапи [27]:

- Пакети надсилаються до цільової області з використанням географічного алгоритму та енергоефективного алгоритму вибору сусіда. Це значить, що вибирається сусід з найвищою енергією,
- Пакети надсилаються між вузлами в конкретній області з використанням рекурсивного географічного алгоритму передачі.

Коли пакет досягає цільової області, він може бути розподілений між усіма вузлами в цій області за допомогою простої схеми переповнення, яка пригнічує повторне передавання. Однак затоплення є дуже енергоємним і неефективним, тому GEAR покладається на рекурсивний процес географічної переадресації, показаний на рисунку 3.12.

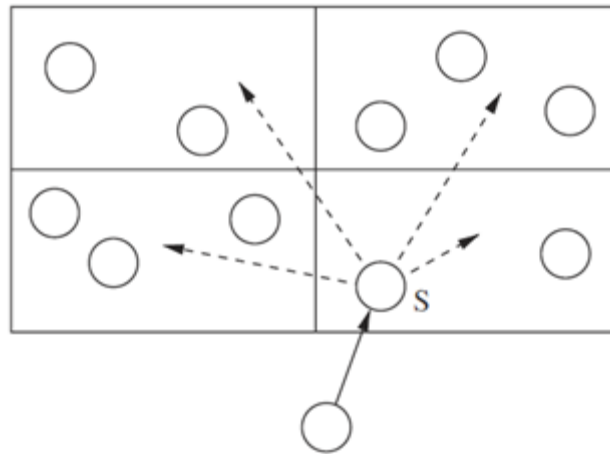


Рис. 3.12 Процес рекурсивної маршрутизації в протоколі GEAR

Наприклад, цільова область є великим прямокутником і вузол S отримує пакет у ній. Тоді S створює чотири нові копії, що відповідають чотирьом меншим субрегіонам великої цільової області. Для кожного субрегіону GEAR повторює процес передачі і розділення, доки пакет не досягне єдиного вузла в цьому субрегіоні [1][21].

Перевага протоколу GEAR полягає в тому, що він зменшує кількість запитів і збільшує економію енергії за рахунок використання запитів, специфічних для певної області, замість того, щоб надсилати запити до всієї мережі.

3.5 Порівняння протоколів маршрутизації для WSN

Розглянуто найбільш відомі методи маршрутизації для бездротових сенсорних мереж.

Якщо враховувати специфіку побудови та призначення мережі, то ми помітимо, що кожен протокол є найбільш придатним для конкретної мережі. Тоді головними параметрами порівняння є енергоефективність та якість обслуговування. Автори розробки методів маршрутизації для мобільних сенсорних мереж спираються на можливість покращити ті чи інші показники QoS, щоб не тільки забезпечити доставку пакетів, але й зробити це ефективно з точки зору QoS. Однак, не слід забувати, що зменшення енергоспоживання погіршить інші метрики та обмежить функціональність мережі.

Тому рішення про вибір методу маршрутизації є специфічним для кожної мережі.

Основні особливості підсумовані в таблиці 3.1 і таблиці 3.2 [3].

Таблиця 3.1

Назва протоколу	Класифікація топології	Мобільність вузлів	Масштабованість мережі
SPIN	плоска	можлива	обмежена
DD	плоска	обмежена	обмежена
RR	плоска	дуже обмежена	велика
GBR	плоска	обмежена	обмежена
OLSR	плоска	дуже обмежена	низька
AODV	плоска	дуже обмежена	низька
LEACH	ієрархічна	фіксована БС	велика
PEGASIS	ієрархічна	фіксована БС	велика
GAF	географічна	обмежена	велика
GEAR	географічна	обмежена	обмежена

Таблиця 3.2

Назва протоколу	Використання енергії	Агрегація даних	Multipath	На основі запитів
SPIN	середнє	так	так	так
DD	середнє	так	так	так
RR	неефективне	так	ні	так
GBR	неефективне	так	ні	так
OLSR	середнє	так	ні	ні
AODV	середнє	так	ні	ні
LEACH	обмежене	так	ні	ні
PEGASIS	обмежене	ні	ні	ні
GAF	обмежене	ні	ні	ні
GEAR	обмежене	ні	ні	ні

Висновки

У третьому розділі проаналізовано класифікацію протоколів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах за трьома головними критеріями: метод організації мережі, методи маршрутизації, принципи

роботи протоколів.

Класифікація протоколів за способом організації мережі:

- Протоколи для мереж з плоскою топологією;
- Протоколи для мереж з ієрархічною топологією;
- Протоколи для мереж з маршрутизацією на основі розташування

вузлів.

Проведено аналіз принципів роботи таких протоколів: SPIN, DD, RR, GBR, OLSR, AODV, LEACH, PEGASIS, GAF, GEAR. Також було враховано особливості використання для різних мережевих цілей. Після порівняльного аналізу протоколів за різними показниками можна зробити такий висновок: кожен протокол є оптимальним лише для конкретної мережі, і користування цим протоколом є неефективним або неможливим в мережах з різною кількістю та розташуванням вузлів. Втім, багато протоколів мають оптимізовані версії з низьким енергоспоживанням, але з низькою якістю обслуговування. Проте, якщо мережа не висуває надважких вимог до якості обслуговування - краще використовувати енергоефективні протоколи маршрутизації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дипломній роботі було розглянуто методи вдосконалення алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах. Було детально описано специфікації мобільних сенсорних мереж. Мобільні сенсорні мережі - це децентралізовані, самоорганізовані, відмовостійкі мережі з великою кількістю автономних електронних вузлів, які можуть обмінюватися і ретранслювати повідомлення по бездротових каналах зв'язку. Завдяки своїй практичності, гнучкості, низькій вартості та здатності працювати у віддалених районах з несприятливими кліматичними умовами, WSN широко використовуються в різних галузях.

Також було досліджено процес маршрутизації в бездротових (мобільних) сенсорних мережах. Представлено параметри, які досягаються за рахунок використання наявних мережевих ресурсів та вибору найбільш оптимального методу маршрутизації. Маршрутизація може коригувати лише невелику частину всіх необхідних показників, що впливають на швидкість і якість передачі інформації, а також на ефективність користування обладнанням за допомогою погіршення менш важливих для конкретної мережі параметрів.

Наостанок, було розглянуто класифікацію протоколів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах. Також, було детально описано алгоритми роботи таких протоколів, як SPIN, DD, RR, GBR, OLSR, AODV, LEACH, PEGASIS, GAF та GEAR. Всі ці протоколи маршрутизації, що ми розглянули - широко використовуються в МСМ і вони є стандартними протоколами з можливістю подальшої оптимізації та модифікації.

Отже, залежно від специфічних характеристик конкретної мережі було проаналізовано доцільність їх використання, проведено аналіз порівняння енергоефективності протоколів та представлено переваги і недоліки кожного протоколу маршрутизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dargie W., Poellabauer C. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. — John Wiley and Sons, 2010. — 330 p.
2. http://tk-its.kpi.ua/sites/default/files/2019-03/Yarmola_magistr.pdf
3. http://tk-its.kpi.ua/sites/default/files/2019-03/Kozyk_magistr.pdf
4. http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2017/1_2017/10.pdf
5. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49779>
6. <https://openarchive.nure.ua/items/46fd8021-af4f-4ba4-ac50-a7bc69ee54ce>
7. Kulik, J. Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks / J. Kulik, W. R. Heinzelman, H. Balakrishnan // Wireless Networks, 2002. – V. 8. – P. 169–185.
8. V. Rodoplu and T. H. Meng, “Minimum Energy Mobile Wireless Networks”, IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 8, Aug. 1999, pp. 133344.
9. Callaway E.H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. – New York: CRC Press LLC, 2004. 350 p
10. Otsason V., Varshavsky A., LaMarca A., de Lara E. Accurate GSM Indoor Localization// Ubicomp, 2005. 158 p.
11. Головна сторінка Discrete Event Simulator OMNeT++. [Електронний ресурс]. URL: <http://omnetpp.org>. Дата звернення 23.11.19.
12. W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00), January 2000.
13. Perlman R. Network Layer Protocols with Byzantine Robustness. – Ph.D. thesis, M.I.T., 1988. – 121 p.
14. Salman A. Baset and Henning Schulzrinne. An Analysis of the Skype Peer-toPeer Internet Telephony protocol. – cs.NI/0412017, arXiv, 5. – Dec 2004.

- 15.Kulik, J. Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks / J. Kulik, W. R. Heinzelman, H. Balakrishnan // Wireless Networks
- 16.Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І. В. «Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник» – К.: НАУ, 2017. – 212 с. ISBN 978-966-932-063-6 .
- 17.Лисенко О.І., Алексєєва І.В. Дослідження операцій. Конспект лекцій. — К: НТУУ «КПІ», 2016. – 196 с.
- 18.Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Наукова думка, 2017. – 730 с
- 19.Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М.Ю.Ільченка, С.О.Кравчука: монографія. - Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019.- 336 с. Рекомендовано до друку ВР КПІ ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2
- 20.Глоба Л.С., Дяденко О.М., Пилипенко А.Ю., Скулиш М.А. Математичні методи аналізу та керування телекомунікаційними мережами. К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2017. – 234 с.
- 21.Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course [S084-Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017.
- 22.<https://www.hufocw.org/Course/263>
- 23.Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course "Digital automatic control systems for information communications engineers", 14 Lectures. Spring 2020.
- 24.<https://www.hufocw.org/Course/197>
- 25.Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці: Методичні рекомендації до виконання практичних

- занять [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 46 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41977>
26. Основи теорії цифрових систем автоматичного керування: LTI моделі для систем SISO та MIMO [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 196 с.
27. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41978>
28. Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачинінв О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. – К.: НАУ, 2016. – 332 с.
29. <http://its.kpi.ua/sites/default/files/NDI%20TK%202021/Конференція%20ПТ/Збірники%20ПТ/Збірник%20матеріалів%20конференції%20ПТ%202017.pdf>