

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____Сергій КРАВЧУК

“ _ ” _____ 2021р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,

на тему: Розвиток алгоритмів маршрутизації у мобільних сенсорних мережа

Виконав: студент 4 курсу, групи ТМ-71

Гуринчук Ілля Олегович

Керівник д.т.н., проф. каф. Телекомунікацій Лисенко О.І.

Рецензент Скулиш Марія Анатоліївна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі 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 – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Гуринчуку Іллі Олеговичу

1. Тема роботи: «Розвиток алгоритмів застосування технологій MIMO у мобільних сенсорних мережах»

керівник роботи: д.т.н. проф. каф. Лисенко О.І.

2. Термін подання студентом роботи 7 червня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи:

1) Безпроводові сенсорні мережі

2) Особливості маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах

3) Протоколи маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах

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

Слайд 1 Тема роботи, метаСлайд 2 Огляд безпроводових сенсорних мереж (WSNs)Слайд 3 Технічні вимоги до БСМСлайд 4 Особливості маршрутизації в БСМСлайд 5 Протоколи маршрутизації в БСМ та методи їх оптимізаціїСлайд 6 Висновки6. Дата видачі завдання 7 жовтня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд сучасних безпроводових сенсорних мереж	15.01.2021-01.02.2021	Виконано
2	Огляд протоколів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах	01.02.2021-13.03.2021	Виконано
3	Аналіз параметрів маршрутизації в бездротових мережах	13.03.2021-08.04.2021	Виконано
4	Аналіз і оцінка енергетичної ефективності	08.04.2021-10.05.2021	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації результатів практики	10.05.2021-21.05.2021	Виконано

Студент

Гуринчук Ілля Олегович

Керівник

Лисенко Олександр Іванович

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської атестаційної роботи: 60 с., 7 рис., та 19 джерел.

Мета роботи – дослідження алгоритмів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах.

В даній роботі розглянуто основні особливості та вимоги до процесу маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Проаналізовані параметри маршрутизації в залежності від призначення мережі. Наведена класифікація способів маршрутизації та розглянуто найвідоміші протоколи маршрутизації. Виконано порівняння цих протоколів та вказані переваги кожного з них.

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

ABSTRACT

The work includes 60 pages, 7 pictures, and 19 information sources.

The purpose of the work is research of routing methods in wireless sensor networks.

This work examines the main principles and features of routing in the wireless sensor network. Routing options have been analyzed depending on the purpose of the network. The classification of routing methods has been given and the most popular protocols have been considered. The comparison of the protocols has been done and benefits of all protocols have been indicated.

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	10
1. БЕЗПРОВОДОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ	12
1.1. Загальні відомості	12
1.2. Особливості БСМ.....	11
1.3. Технічні вимоги до БСМ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.4. Використання БСМ.....	19
Висновки до розділу 1	20
2. ОСОБЛИВОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	22
2.1. Основні принципи та задачі маршрутизації.....	22
2.2. Аналіз параметрів маршрутизації в БСМ.....	25
2.2.1. Кількість проміжних вузлів	26
2.2.2. Енергія.....	26
2.2.3. Надійність	30
2.2.4. Якість обслуговування	31
Висновки до розділу 2	35
3. ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.1. Парадигми алгоритмів у безпроводових сенсорних мережах....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2. Обмеження бездротових сенсорних мережах	Ошибка! Закладка не определена.
3.3. Класифікація протоколів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах	39
3.3.1. Роль ієрархії вузлів у мережі	39
3.3.2. Модель передачі даних.....	39

3.4. Методи оптимізації маршрутизації в БСМ	40
3.4.1. На основі атрибутів	40
3.4.2. Енергоефективність	40
3.4.3. Агрегація даних.....	41
3.4.4. Схема адресації	41
3.4.5. Місцезнаходження	41
3.4.6. Багатопроменеве спілкування	42
3.4.7. Якість обслуговування	42
3.5. Застосування методів оптимізації: протоколи маршрутизації.....	42
3.5.1. Протоколи маршрутизації на основі атрибутів або орієнтованії на дані.....	43
3.5.2. Протоколи географічної маршрутизації.....	46
3.5.3. Ієрархічні протоколи маршрутизації	49
3.5.4. Протоколи багатопроменевої маршрутизації	52
3.5.5. Порівняння.....	53
Висновки до розділу 3	Ошибка! Закладка не определена.
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ...	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AODV	(Ad-hoc On-demand Distance Vector) – однорангова дистанційна маршрутизація по вимозі
BER	(Bit Error Rate) – коефіцієнт помилкових бітів
CH	(Cluster Head)– голова кластеру
CM	(Cluster Members)–член кластеру
DD	(Directed Diffusion) – спрямована дифузія
GAF	(Geographic Adaptive Fidelity) – географічний адаптивний протокол
GBR	(Gradient-BasedRouting) – маршрутизація заснована на градієнтах
GEAR	(GeographicandEnergyAwareRouting) – протокол географічної і енергозберігаючої маршрутизації
GPS	(Global Positioning System) – система глобального позиціонування
IP	(InternetProtocol) – мережевий протокол
LEACH	(Low-EnergyAdaptiveClusteringHierarchy) – 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 InformationSystems) – протокол енергоефективного збору інформації в сенсорних мережах
QoS	(Quality of Service) – якість обслуговування
RR	(Rumorrouting) – 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
WSN	(WirelessSensorNetwork) – безпроводова сенсорна мережа
БС	базова станція
БСМ	безпроводова сенсорна мережа

ВСТУП

Останнім часом активно розвиваються бездротові технології, які в поєднанні з досягненнями мікропроцесорних та вимірювальних технологій дали можливість створити новий клас систем передачі даних - бездротові сенсорні мережі. Бездротова сенсорна мережа (БСМ) - це розподілена, самоорганізуюча та витримує несправності мережа з великою кількістю (до десятків тисяч) автономних електронних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями та ретрансляцією їх за бездротовим каналом зв'язку.

Безпроводові сенсорні мережі можуть бути ефективно використані для вирішення різних прикладних задач, пов'язаних з розподіленим збором, обробкою і аналізом інформації в таких сферах, як автоматизація комплексів, промислова автоматика, безпека і оборона, моніторинг навколишнього середовища, охорона здоров'я і т.п., володіючи при цьому наступними перевагами:

- відсутність необхідності в прокладанні кабелів для електроживлення і передачі даних;
- низька вартість монтажу і технічного обслуговування системи;
- зручність розміщення автономних безпроводових вузлів в різноманітних точках простору;
- можливість впровадження і модифікації мережі на експлуатуємому об'єкті при мінімальному втручанні в процес його функціонування;
- надійність і відмовостійкість всієї системи в цілому при виході з ладу окремих вузлів або при порушенні зв'язку між ними.

У загальному випадку безпроводові сенсорні мережі є одноранговими мережами, в яких всі вузли рівноправні, мають автономні джерела живлення та можуть виступати в ролі ретрансляторів пакетів інформації. Внаслідок цього для БСМ надзвичайно актуальним постає вирішення наступних завдань:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів. Оптимальним вважається маршрут доставки пакетів інформації від вузла-відправника до вузла-отримувача, що вимагає мінімальних сумарних витрат ресурсів (наприклад, енергії) вузлів, що задіяні у цьому маршруті.
- завдання маршрутизації із забезпеченням максимального часу життя мережі. Під часом життя мережі розуміється термін її експлуатації до першого виходу з ладу одного з вузлів через виснаження автономного джерела живлення.

Отже, ефективність функціонування безпроводових сенсорних мереж багато в чому визначається вибором протоколу маршрутизації пакетів. Неправильний вибір протоколу маршрутизації призводить до нерівномірного завантаженості вузлів задіяних в ретрансляції пакетів, а це в свою чергу призводить до швидкої витрати заряду батарей цих вузлів.

Таким чином, вибір правильного способу маршрутизації є одним із головних факторів при розробці безпроводової сенсорної мережі.

Метою дипломної роботи є дослідження особливостей алгоритмів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах та аналіз актуальних протоколів маршрутизації в БСМ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідження основних особливостей та вимог до БСМ;
- дослідження та класифікація способів маршрутизації в БСМ;
- аналіз основних способів маршрутизації в БСМ;
- порівняти переваги та недоліки для відомих протоколів маршрутизації в БСМ.

Об'єктом дослідження є безпроводова сенсорна мережа, а предметом дослідження – способи маршрутизації в БСМ.

1. БЕЗПРОВОДОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

1.1. Загальні відомості

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) призначені для моніторингу навколишнього середовища. Основним завданням бездротового вузла датчика є сприйняття та збір даних з певного домену, їх обробка та передача в приймач, де знаходиться програма. Однак забезпечення прямого зв'язку між датчиком і раковиною може змусити вузли випускати свої повідомлення з такою великою потужністю, що їх ресурси можуть швидко вичерпатися. Тому співпраця вузлів, щоб забезпечити зв'язок віддалених вузлів з раковиною, є обов'язковою вимогою. Таким чином, повідомлення поширюються проміжними вузлами, так що встановлюється маршрут з кількома посиленнями або стрибками до раковини.

Беручи до уваги зменшені можливості датчиків, спочатку зв'язок із раковиною можна було задумати без протоколу маршрутизації. З цією передумовою алгоритм затоплення виділяється як найпростіше рішення. У цьому алгоритмі передавач транслює дані, які послідовно повторно передаються, щоб змусити їх прибути до запланованого пункту призначення. Однак його простота призводить до значних недоліків. По-перше, виявляється імплюзія, оскільки вузли надмірно отримують кілька копій одного і того ж повідомлення даних. Потім, оскільки подія може бути виявлена кількома вузлами в зоні ураження, у мережу вводяться кілька повідомлень даних, що містять подібну інформацію. Більше того, вузли не враховують свої ресурси для обмеження своїх функціональних можливостей.

Одна оптимізація спирається на алгоритм пліток. Плітки уникають імплузії, оскільки датчик передає повідомлення вибраному сусіду, замість того, щоб інформувати всіх своїх сусідів, як у класичному алгоритмі затоплення. Однак дублювання та ресурсна сліпота все ще існують. Крім

того, ці незручності висвітлюються, коли кількість вузлів у мережі збільшується.

Через недоліки попередніх стратегій протоколи маршрутизації стають необхідними в бездротових сенсорних мережах. Тим не менше, включення протоколу маршрутизації в бездротову сенсорну мережу не є тривіальним завданням. Одним з основних обмежень є ідентифікація вузлів. Оскільки бездротові сенсорні мережі утворені значною кількістю вузлів, присвоєння унікальних ідентифікаторів вручну стає неможливим [2]. Використання потенційно унікального ідентифікатора, такого як MAC (Medium Access Control) або GPS-координати, не рекомендується, оскільки це призводить до значного корисного навантаження в повідомленнях [3]. Однак цей недолік легко подолати в бездротових сенсорних мережах, оскільки IP-адреса не потрібна для ідентифікації вузла призначення конкретного пакета. Насправді адресація на основі атрибутів краще відповідає особливостям бездротових сенсорних мереж. У цьому випадку для визначення кінцевого пункту призначення використовується такий атрибут, як розташування вузла та тип датчика.

Після ідентифікації вузлів протоколи маршрутизації відповідають за побудову та підтримку маршрутів між віддаленими вузлами. Різні способи роботи протоколів маршрутизації роблять їх придатними для певних програм.

У відповідній літературі є безліч пропозицій щодо алгоритмів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах. Цей документ спрямований на опис найбільш актуальних з метою полегшення розуміння різних методів маршрутизації, які можуть бути застосовані до бездротових сенсорних мереж. Зокрема, в статті пояснюються деякі атрибутивні, географічні, ієрархічні та багатопроточні протоколи маршрутизації.

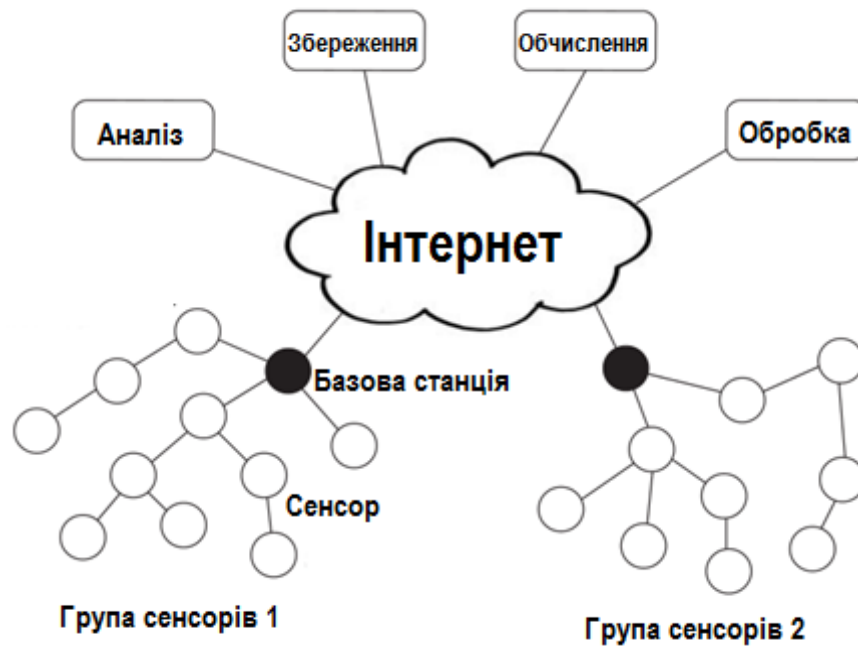


Рисунок 1.1 Безпроводова сенсорна мережа

Отже, однією з основних цілей проектування БСМ є здійснення обміну даними при одночасному прагненні продовжити термін служби мережі і запобігти погіршенню з'єднання шляхом використання методів управління енергією, зокрема, вибору доцільного способу маршрутизації.

1.2. Особливості БСМ

У той час як безпроводові сенсорні мережі мають багато спільних проблем з іншими розподіленими системами, вони мають ряд ключових відмінностей від інших типів безпроводових мереж передачі інформації, таких як локальні безпроводові мережі і мобільні епізодичні мережі.

Перелічимо основні особливості БСМ [3]:

- великі масштаби мережі – кількість вузлів в мережі може досягати десятків тисяч;
- складна топологія – в загальному випадку мережа має багатокоміркову топологію, де всі або більшість вузлів є нерухомими;

- обмежені ресурси вузлів – ємність автономного джерела живлення, обчислювальна потужність і пам'ять мікропроцесора, пропускна здатність каналів зв'язку та ін. дуже обмежені;
- види трафіку – в залежності від поточної прикладної задачі здійснюється підтримка типів трафіку «багато-до-одного», «один-до-багатьох» і «багато-до-багатьох»;
- розміщення вузлів – розташування вузлів в просторі може бути випадковим або детермінованим, їх розподіл по площі покриття мережі може бути як рівномірним, так і нерівномірним;
- самоорганізація і відмовостійкість – вузли можуть самостійно налаштовуватися на етапі розгортання системи, а також в процесі роботи адаптуватися до умов навколишнього простору та поточного режиму експлуатації;
- масштабованість – кількість службового мережевого трафіку і необхідний обсяг пам'яті вузлів майже не залежить від загального розміру мережі;
- модель генерації повідомлень – вузли можуть виконувати передачу пакетів за часом (періодично), за подією або, за запитом від зовнішнього отримувача інформації, при цьому можливі різні комбінації перерахованих варіантів;
- різномірність вузлів і з'єднань – вузли можуть мати різні енергетичні ресурси, обсяги пам'яті і т.п., а безпроводні канали відрізняються швидкістю передачі даних, надійністю, відстанню зв'язку і т.п..

1.3. Технічні вимоги до БСМ

Завдяки очевидним перевагам, безпроводові сенсорні мережі є доволі затребуваною технологією. Це сприяє швидким темпам розвитку БСМ. Проте

основними завданнями при розробці безпроводових сенсорних систем залишається створення малогабаритних, дешевих і більш ефективних пристроїв. Але подібні вимоги створюють жорсткі обмеження для багатфункціональності БСМ. Оскільки сенсорні вузли з невеликим споживанням енергії мають дуже малу обчислювальну потужність, яку можна зіставити із комп'ютерними системами минулого десятиліття [4]. Невеликий розмір датчику і низьке споживання енергії також забороняє інтеграції багатьох бажаних функцій та компонентів, наприклад, GPS приймачів.

Проблема енергоефективності пов'язана з тим фактом, що сенсорні вузли працюють з обмеженим запасом енергії. Як правило, вони розраховані на живлення від акумуляторів, які повинні бути замінені або заряджені одразу після їх розрядки. Водночас для деяких вузлів жоден з варіантів не підходить. В такому випадку вони будуть просто відкинуті, як тільки їх джерело енергії буде вичерпано. Насамперед це негативно впливає на якість та кількість отриманої інформації і ефективність використання обладнання. Можливість заряду акумулятора також істотно впливає і на стратегію споживання енергії при виконанні збору і передачі інформації. Для одноразових батарей, сенсорний вузол повинен бути здатний працювати до закінчення часу його місії, або до моменту, коли батарея може бути замінена.

Як наслідок, першим і зазвичай найбільш важливим завданням при проектуванні БСМ є саме енергетична ефективність. Ця вимога відбивається на розробці як сенсорного вузла, так і при проектуванні всієї мережі.

Безпроводові сенсорні мережі зазвичай використовують у віддалених районах і суворих кліматичних умовах, без належної інфраструктури, можливості обслуговування та ремонту системи. Це не тільки негативно впливає на технічний стан обладнання, а й ускладнює швидке відновлення працездатності системи, у разі виникнення несправності. Таким чином, сенсорні вузли повинні бути стійкими до зовнішніх чинників впливу та самоорганізованими щодо налаштування власних параметрів, взаємодії з

іншими вузлами, адаптації до збоїв, змін навколишнього середовища, а також зміни факторів, які впливають на роботу системи, без втручання людини. Тобто, всі вищеперелічені функції, повинні виконуватись в автономному режимі. При цьому важливою функцією є оптимізація, яка відноситься до здатності пристрою робити моніторинг і варіювати використання власних ресурсів. Нарешті, здатність самостійно відновлюватися дозволяє сенсорним вузлам ідентифікувати і реагувати на мережеві збої. В енергетично обмежених сенсорних мережах всі ці функції самоорганізації повинні бути розроблені і впроваджені таким чином, щоб вони не викликали значних додаткових витрат енергії.

Використання безпроводових мереж для зв'язку між вузлами створює ряд проблем при розробці БСМ. Наприклад, ослаблення сигналу обмежує відстань поширення радіосигналів, тобто, радіочастотний сигнал зменшується в силі, поки він поширюється через середовище і при проходженні через перешкоди.

Велика кількість елементів мережі та енергетичні обмеження багатьох безпроводових сенсорних мереж не дозволяють завжди покладатися на централізовані алгоритми управління топологією та маршрутизацією, які б можливо було виконати на базовій станції. Замість цього, сенсорні вузли повинні співпрацювати з сусідніми до них вузлами для прийняття локальних рішень, без використання глобальних відомостей. Як наслідок, результат цих децентралізованих алгоритмів не буде оптимальним, але може бути більш енергетично ефективним, ніж централізовані рішення, за рахунок зменшення об'єму переданої службової інформації управління. Хоч даний метод негативно впливає на ефективності системи в цілому, але дає змогу подовжити час життя мережі.

Багато безпроводових сенсорних мереж застосовується для збору конфіденційної інформації. Проте дистанційна та автономна робота сенсорів підвищує ризик шкідливих мережевих атак. Крім того, безпроводова передача даних спрощує перехоплення інформації при передачі даних від датчиків.

Наприклад, однією з найбільших загроз для функціонування мережі є атаки, метою яких є порушення нормальної роботи сенсорної мережі. Це може бути досягнуто з використанням різних атак, насамперед за допомогою приглушення сигналу, що погіршує якість зв'язку між вузлами. Наслідки можуть бути дуже серйозними і залежать від сфери застосування сенсорних мереж. Існують численні методи вирішення проблеми безпеки для розподілених систем, які запобігають атакам або обмежують їх вплив, проте більшість з них вимагає значних обчислювальних ресурсів. Ці вимоги часто не можуть бути виконані через обмеженість ресурсів сенсорних вузлів. Як наслідок, сенсорні мережі вимагають нових рішень для створення аутентифікації вузлів і шифрування інформації.

На основі викладеного вище можна зробити висновок, що багато рішень при розробці БСМ відрізняється від проектних рішень інших систем і мереж. Ряд додаткових проблем можуть впливати на конструкцію сенсорних вузлів і планування безпроводових сенсорних мереж. Наприклад, деякі датчики можуть бути встановлені на рухомих об'єктах, таких як транспортні засоби, що призводить до безперервної зміни топології мережі. У таких системах потрібна оперативна адаптація на декількох рівнях системи, в тому числі маршрутизації (наприклад, зміна списків сусідніх вузлів), управління доступом до середовища (наприклад, тривалості заняття каналу), і агрегації даних. Вузлам датчиків буде необхідно більше апаратних ресурсів, якщо їх завдання вимагає більше обчислень і збереження даних, або якщо вони відповідають за збір та обробку даних отриманих від певної кількості інших датчиків в мережі. Крім того, деякі сенсори можуть мати специфічні вимоги до продуктивності і якості даних.

1.4. Використання БСМ

Сфера використання безпроводових сенсорних мереж може бути різноманітною: від датчиків руху на охоронюваних об'єктах, до системи контролю за вологістю повітря у бібліотечних архівах. БСМ можуть бути використані на будь-яких ділянках, де необхідний збір інформації про стан предметів, середовища, явища або процесу [5].

БСМ ідеально підходять для роботи на віддалених ділянках, де неможливо здійснювати постійне пряме втручання людини.

БСМ широко використовуються у системах для моніторингу і захисту цивільної інфраструктури, національної енергосистеми і трубопровідної інфраструктури. Мережі із тисяч вузлів та датчиків вже використовується для моніторингу великих природних територій, моделювання і прогнозування забруднення навколишнього середовища і повеней, збору інформацію про цілісність структури на мостах за допомогою датчиків вібрації, контролю використання води, добрив і пестицидів для поліпшення здоров'я і кількості врожаю.

Один з підходів до вирішення проблеми заторів є використання розподілених сенсорних систем. Ці системи збирають інформацію про щільність, розмір і швидкості транспортних засобів на дорогах, сигналізують про затори і пропонують водіям деякі альтернативні маршрути.

Широке застосування БСМ знайшли у системі «Розумний дім». Дана система полягає в відслідковуванні усіх показників помешкання (наприклад, температура повітря або освітленість) і самостійному прийнятті рішень по їх зміні, у відповідності із встановленими нормами. Також можливе дистанційне керування пристроями, які підключенні до даної системи.

Висновки до розділу 1

У даному розділі були розглянуті загальні відомості про безпроводові сенсорні мережі.

БСМ – це розподілена мережа із великої кількості датчиків, які об'єднанні між собою за допомогою радіоканалу, стійка до відмови окремих елементів, з можливістю самоорганізації. Зона покриття БСМ може складати від декількох метрів до десятків кілометрів за рахунок функції ретрансляції повідомлень від одного вузла до іншого.

Проаналізовано принцип обміну інформації між вузлами мережі та розглянуто узагальнену структурну схему безпроводової сенсорної мережі.

Детально розглянуто особливості безпроводових сенсорних мереж, порівняно з іншими типами розподілених мереж.

Переваги безпроводових сенсорних мереж:

- велика кількість елементів мережі;
- автономність джерела живлення для кожного вузла;
- підтримка різних видів трафіку та протоколів маршрутизації;
- можливість реалізації різноманітних схем розташування вузлів;
- самоорганізація;
- відмовостійкість;
- невеликі розміри датчиків;
- різнорідність вузлів і з'єднань.

На етапі проектування мережі, накладається багато обмежень на технічні характеристики кожного елементу мережі і модель мережі в цілому. Здебільшого вони викликані обмеженими енергетичними ресурсами датчиків. Однією з основних цілей проектування БСМ є здійснення обміну даними при одночасному прагненні продовжити термін служби мережі і запобігти погіршенню з'єднання. Одним із найефективніших методів управління енергії є вибір оптимального способу маршрутизації.

Розглянуто сфери використання безпроводових сенсорних мереж. Наведено приклади використання БСМ у повсякденному житті людини, для охорони об'єктів, у різних галузях виробництва, медицині, для оцінки стану навколишнього середовища, моніторингу масштабних систем, для оцінки технічного стану конструкцій.

2. ОСОБЛИВОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Основні принципи та задачі маршрутизації

Дані, зібрані датчиками в бездротових сенсорних мережах, як правило, передаються до базової станції, яка підключає BSM до інших мереж, де дані можуть оброблятися та аналізуватися. Процес встановлення шляху повідомлення від джерела до приймача (наприклад, базової станції) через один або кілька ретрансляторів називається маршрутизацією і є основною відповідальністю мережевого рівня набору протоколів зв'язку.

У невеликих сенсорних мережах, де датчики розташовані близько один до одного, може бути прямий зв'язок між усіма вузлами датчиків і базовою станцією. На рис. 2.1 показаний принцип прямого зв'язку, коли всі вузли датчиків можуть зв'язуватися з приймачем, не передаючи повідомлення через інші вузли. Ця модель прямого спілкування є найпростішою реалізацією, коли всі дані роблять один стрибок для досягнення мети.

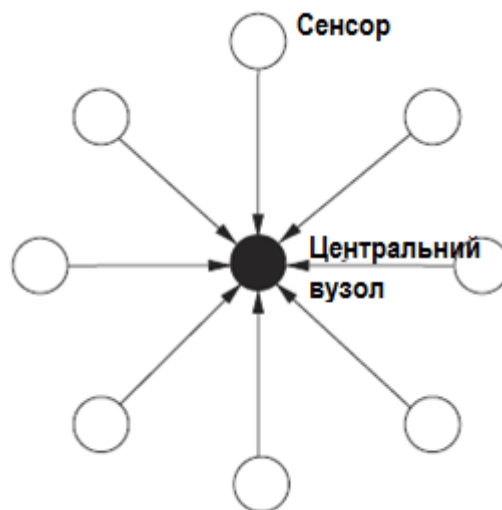


Рисунок 2.1 Модель прямого зв'язку

Однак більшість BSM складаються з великої кількості вузлів датчиків, які охоплюють велику територію, що вимагає використання непрямого

зв'язку (рис. 2.2). Тобто, вузли датчиків повинні не тільки генерувати та поширювати власну інформацію, а й виконувати функцію передачі повідомлень від інших вузлів датчиків. У цьому випадку вирішальним завданням для мережевого рівня всіх вузлів датчиків є визначення шляху від датчика до приймача через багато інших вузлів датчиків, які діють як проміжні вузли.

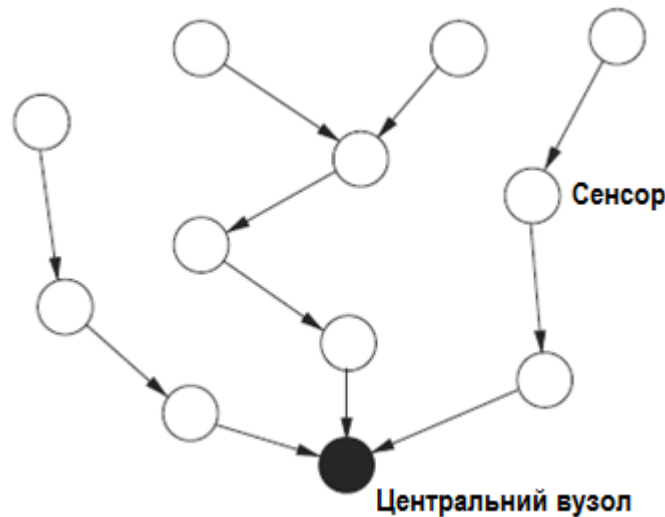


Рисунок 2.2 Модель непрямого зв'язку

Цей метод маршрутизації протоколу є складним через унікальні характеристики BSM, такі як брак ресурсів або ненадійність бездротового середовища. Наприклад, обмежена обробка даних, зберігання, пропускна здатність та енергоспоживання вимагають легких рішень маршрутизації, тоді як можливі зміни в топології мережі вимагають рішень маршрутизації, які легко настраюються та змінюються.

Коли вузли BSM розгортаються детермінованим чином (тобто вони знаходяться в певних конкретних місцях), для зв'язку між ними та базовою станцією будуть використовуватися конкретні маршрутні маршрути. Однак, якщо вузли розташовані хаотично, топологія мережі є неоднорідною та непередбачуваною. У цьому випадку першочерговим завданням вузлів є самоорганізація, тобто вони повинні співпрацювати для визначення свого розташування в просторі, ідентифікації сусідніх вузлів та пошуку шляху до базової станції [6].

У галузі BSM одним з найважливіших параметрів є час життя мережі, який визначається як термін служби мережі до першого виходу з ладу одного з вузлів через виснаження автономного джерела живлення.

Простий пошук маршрутів з мінімальними витратами може призвести до нерівномірного розподілу навантаження мережі між вузлами мережі, оскільки вузли на часто використовуваних оптимальних маршрутах будуть частіше повторно передавати пакети. Тому можуть бути сформовані пункти, які будуть використовуватися для одночасної ретрансляції великих обсягів інформації. Поява таких точок при підвищеному навантаженні на вузли, сприяє проблемам з пропускнуою здатністю та передчасним виснаженням джерел енергії елементів. Тому для забезпечення високої ефективності та тривалості життя мережі в цілому необхідно виконати так звану балансування навантаження. Тобто розподіл транспортних потоків між вузлами для більш рівномірного використання їх ресурсів (насамперед енергії). Таким чином, завдання пошуку маршрутів з балансуванням навантаження полягає в оптимізації загальних енергетичних витрат мережі, а не окремо для кожного з маршрутів.

Тому для бездротових сенсорних мереж ми можемо розрізнити два завдання маршрутизації, які будуть відрізнятися в критеріях пошуку маршрутів:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів - оптимальним маршрутом є спосіб доставки інформаційних пакетів від відправляючого вузла до вузла призначення, що вимагає мінімального загального споживання ресурсів вузлів цього шляху;
- завдання маршрутизації для забезпечення максимального терміну служби мережі.

2.2. Аналіз параметрів маршрутизації в БСМ

Залежно від призначення, бездротові сенсорні мережі широко відрізняються своїми обмеженнями та характеристиками, що слід враховувати при розробці протоколу маршрутизації. Наприклад, більшість BSM будуть обмежені енергетичними ресурсами, продуктивністю, ємністю зберігання. Сенсорні мережі можуть сильно відрізнятися за масштабами та площею географічних районів, якими вони охоплюють. Програми адресації у всьому світі (наприклад, IP-адреси, що використовуються в Інтернеті) можуть бути недоступними і навіть непрактичними, особливо в мережах з різними типами вузлів та мобільних вузлів. Нарешті, залежно від призначення інформації, сенсорні дані будуть збиратися різними способами, які відрізняються один від одного. У керованих часом схемах (наприклад, моніторинг навколишнього середовища) вузли періодично розподіляють зібрані ними дані до приймача. У керованих подіями схемах (наприклад, виявлення руйнівних пожеж) вузли повідомляють інформацію, яку вони збирають, лише тоді, коли відбувається подія, що їх цікавить. Нарешті, в керованих запитами схемах приймач надсилає запит на збір даних і збирає дані з датчиків лише тоді, коли це необхідно [7].

Тому параметри маршрутизації використовуються для характеристики різних цілей протоколів маршрутизації з урахуванням використання цих

ресурсів. Розглянемо найважливіші параметри та критерії при розробці методу маршрутизації.

2.2.1. Кількість проміжних вузлів

Найбільш поширеною метрикою, яка використовується в протоколах маршрутизації, є мінімальний стрибок (або найкоротший стрибок), тобто протокол маршрутизації намагається знайти шлях від відправника до одержувача, який вимагає найменшої кількості проміжних вузлів. У цьому простому алгоритмі кожна лінія має певну вартість, і протокол маршрутизації обирає шлях, який мінімізує загальну вартість поширення даних від джерела до пункту призначення. Основна ідея цієї метрики полягає в тому, що використання найкоротшого шляху зменшить час передачі та низькі витрати ресурсів, оскільки залучатиме якомога менше вузлів передачі. Однак, оскільки цей підхід не враховує фактичну наявність ресурсів на кожному вузлі, отриманий маршрут, ймовірно, буде неоптимальним з точки зору збереження енергії та запобігання перевантаженню. Багато бездротових сенсорних мереж можуть вимагати використання вузлів з різними апаратними можливостями, такими як потужність, пропускна здатність, відстань передачі. Тому в процесі маршрутизації необхідно враховувати різноманітність елементів мережі.

Однак мінімальна метрика стрибків використовується у багатьох протоколах маршрутизації завдяки своїй простоті та практичності.

2.2.2. Енергія

Безперечно, ключовим аспектом маршрутизації в BSM є енергоефективність. Як правило, серед елементів вузла найбільше енергії споживає приймач, тому основним способом зменшення середнього енергоспоживання вузла є мінімізація активності в радіоканалі. Враховуючи, що кожен вузол є не лише джерелом або одержувач інформації, але також, якщо потрібно, проміжний ретранслятор пакетів, оптимізація обсягу та напрямку потоку трафіку є важливим завданням рівня маршрутизації.

Існує більше одного унікального показника енергії, який можна застосувати до завдання маршрутизації. Існують різні трактування енергоефективності, однак, однією з ключових є ідея мінімального споживання енергії на упаковку. Це найпростіша концепція енергоефективності, тобто її метою є мінімізація загальної кількості енергії, яка використовується для розподілу єдиного пакету від джерела до пункту призначення. Загальна енергія - загальна енергія, споживана кожним вузлом по маршруту для отримання та передачі пакету. На рис. 2.3 показаний приклад малої сенсорної мережі, де вихідний вузол хоче передати пакет до вузла призначення за допомогою маршруту, який мінімізує накладні витрати енергії на пакет. Цифра в кожному рядку вказує на вартість пакета, що розподіляється в цьому напрямку. Як результат, цей пакет буде передаватися через вузли А - D - G із загальною вартістю 5. Можна зазначити, що цей маршрут відрізняється від опції, використовуючи мінімальний стрибковий шлях (B - G).

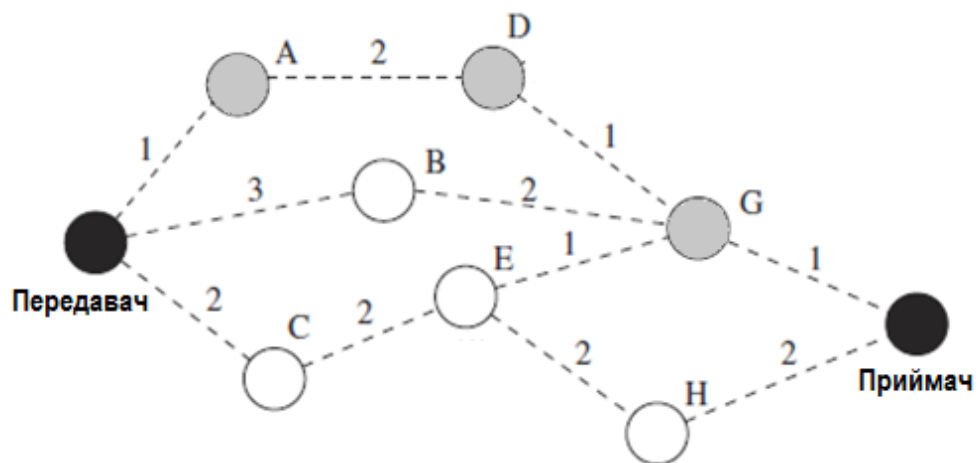


Рисунок 2.3 Вибір маршруту за умови мінімальної витрати енергії на пакет

Концепція максимального часу спільного використання мережі полягає в тому, щоб розділити всю мережу на кілька менших підмереж. Це відбувається, коли останній вузол, що з'єднує дві частини мережі, виходить з ладу. Як результат, підмережі можуть бути недоступні, а робота вузлів датчиків у цій підмережі марна. Таким чином, завдання полягає у зменшенні

споживання енергії на вузлах, які є критично важливими для підтримки мережі, в якій кожен вузол датчика може бути досягнутий щонайменше одним шляхом. Наприклад, мінімальний набір вузлів, видалення яких призведе до поділу мережі, можна знайти, використовуючи теорему про максимальний потік і мінімальний переріз. Як тільки протокол маршрутизації визначить ці критичні вузли, ви можете спробувати збалансувати навантаження на мережу. На рис. 2.4 вузол D - вирішальний вузол. Наприклад, якщо батарея цього вузла вичерпана, вузли F, I, J будуть недоступні для будь-якого іншого вузла в мережі.

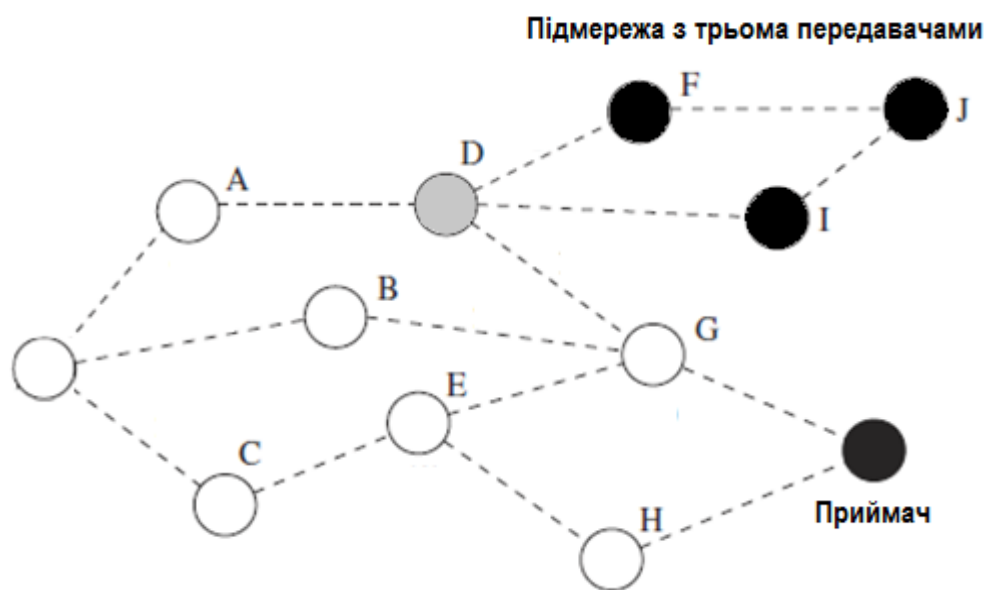
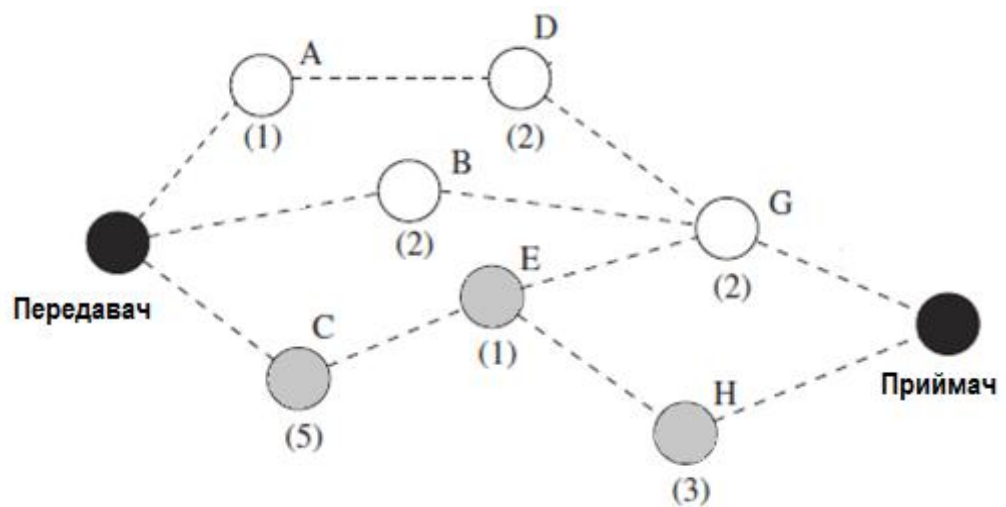


Рисунок 2.4 Вибір маршруту за критерієм максимального часу поділу мережі

У разі використання концепції мінімальної різниці рівнів потужності вузлів всі вузли в мережі вважаються однаково важливими, і завдання полягає у розподілі споживання енергії між усіма вузлами мережі як можна рівномірніше. Метою цього підходу може бути максимізація терміну служби всієї мережі, наприклад, замість того, щоб деякі вузли виснажувались раніше, ніж інші, що постійно зменшувало б розмір мережі, ви можете прагнути зберегти більше робочих вузлів, якщо наскільки це можливо. В ідеалі всі вузли слід вимикати одночасно, але такий сценарій практично неможливий.

За допомогою методу визначають середнє споживання енергії. У цьому підході ключовим моментом є не енергетичні витрати на розповсюдження пакетів, а енергоспоживання (наприклад, поточний рівень заряду акумулятора) вузлів. Протокол маршрутизації, який використовує цю метрику, встановлює маршрут, що має найбільшу загальну потужність вузла, від джерела до приймача. На рисунку 2.5 цифри під вузлами вказують на споживання енергії вузлами. У цьому прикладі протокол маршрутизації може вибрати шлях С-Е-Н, що має найбільшу загальну потужність. Протокол маршрутизації, який використовує цю метрику, повинен бути ретельно розроблений, щоб уникнути ризику вибору надмірно довгих маршрутів, щоб максимізувати загальну пропускну здатність енергії. Зміна цього показника полягає в максимізації середнього споживання енергії, що дозволяє уникнути цієї



проблеми.

Рисунок 2.5 Вибір маршруту за середньою енергоємністю

В принципі, найбільша мінімальна кількість енергії, замість максимізації енергетичної потужності на всьому шляху, основною метою маршрутизації є вибір шляху з найбільшим мінімальним споживанням енергії. Цей метод також допомагає маршрутам з великими запасами енергії, але також захищає вузли малої потужності від передчасного закінчення. На рис. 2.6 протокол, який використовує цей індикатор, вибирає маршрут В - G,

оскільки мінімальна пропускна здатність на цьому маршруті дорівнює 2, що перевищує мінімальну пропускну здатність вузлів на всіх інших можливих маршрутах.

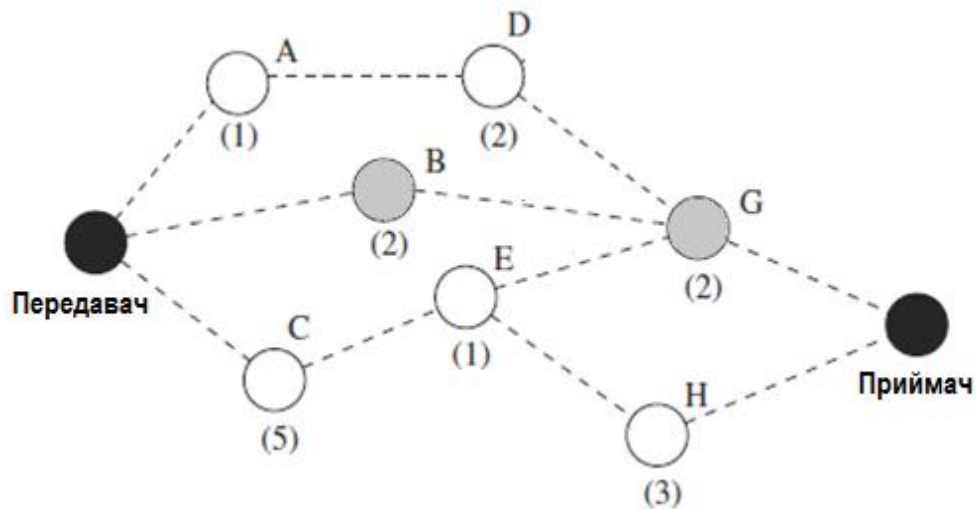


Рисунок 2.6 Вибір маршруту за найбільшим мінімальним обсягом енергії

Ці різні формулювання способів збільшення економії енергії призводять до дуже різного впровадження протоколів, які відрізняються за своїми результатами та витратами. Наприклад, щоб визначити мінімальну енергію, споживану для кожного пакета, вартість отримання та передачі пакету може залежати від розміру пакета. З іншого боку, енергетичні потужності змінюються з часом, а отже, протокол маршрутизації з використанням метрик, що базуються на потужності, повинен періодично оновлювати ці дані.

2.2.3. Надійність

Передбачається, що умови роботи BSM можуть бути жорсткими, тому існує ймовірність виходу з ладу вузлів і порушення зв'язку між ними. Тому, щоб забезпечити високу надійність системи в цілому, метод маршрутизації повинен автоматично генерувати нові маршрути в обхід виключених вузлів, витрачаючи якомога менше ресурсів на переналаштування маршруту.

Багато систем вибирають маршрути, які залишаються стабільними протягом тривалого часу. Для цього вузол може змінити і оцінити якість каналу в порівнянні з сусідами, а потім вибрати сусіда для наступного стрибка, що збільшує ймовірність успішної передачі. Протокол маршрутизації може визначити кілька шляхів для мінімального переходу, а потім вибрати той, який гарантує найкращу якість серед усіх маршрутів. У мережах з мобільними вузлами протокол маршрутизації може також використовувати потужну метрику зв'язку, яка вимірює, наскільки канал буде доступним у майбутньому. Ці метрики можна використовувати для вибору серед більш надійних маршрутів та фіксованих вузлів.

2.2.4. Якість обслуговування

Термін якість обслуговування (QoS) відноситься до певних показників ефективності в мережах, зокрема для виявлення затримки передачі пакетів, рівня пропускної здатності та частоти помилок.

Вибір метрики QoS залежить від типу програми. Сенсорні мережі, які виявляють і відстежують цілі, вимагають низьких затримок при передачі термінових даних датчиків, тоді як мережі з інтенсивним обміном даними (наприклад, мультимедійні сенсорні мережі) вимагають великої пропускної здатності.

Коли метод маршрутизації вибирає маршрут передачі даних, який є оптимальним з точки зору деяких показників якості обслуговування, він спирається у своїй оцінці на набір параметрів стану вузлів та каналів зв'язку. Ці параметри відображають поточну картину розподілу трафіку в мережі, тому їх аналіз дозволяє вибрати відповідні маршрути передачі даних, наприклад, в обхід заторів у мережі або мінімізувати затримки пакетної передачі.

Мережевий ресурс - це буквально будь-який ресурс, який споживається під час завдань пошуку відповідного маршруту, встановлення та ведення сеансів даних, підтримки таблиць маршрутизації. Далі наводиться класифікація мережевих ресурсів.

Мережеві ресурси, необхідні для забезпечення якості маршрутизації:

- Час процесора. Хоча мобільні пристрої мають щороку потужніші процесори, вони все ще обмежені у своїх обчислювальних потужностях і не можуть конкурувати з традиційними настільними комп'ютерами. Однак це найменш важливий фактор, оскільки методи маршрутизації зазвичай не створюють великого навантаження на процесор;

- обсяг вузла буфера пакетів. Неминучий факт, що під час роботи мережі кілька вузлів одночасно передають пакети даних або маршрут до будь-якого вузла, ще не виявлений, тому необхідно тимчасово помістити пакети в буфер. Більше того, коли буфери повністю заповнюються, всі вхідні пакети будуть відкинуті, що призводить до збільшення частки втрачених пакетів;

- пропускна здатність каналу зв'язку. Зазвичай вимірюється в бітах за секунду і вказує безпосередньо швидкість передачі даних та затримку. Однак, оскільки багато вузлів використовують канал зв'язку одночасно, нам потрібно якось виразити частку пропускної здатності, яку отримує кожен вузол. Спосіб вираження частки залежить від способу доступу до середовища передачі. За допомогою методу конкурентного доступу жоден вузол не має гарантованого доступу до каналу у бажаний час, оскільки одночасно інші вузли також можуть розпочати передачу даних. Тому доступ до середовища передачі надається лише з певною ймовірністю. Однак більшість методів маршрутизації засновані на тому, що доступ до середовища передачі надається на конкурентній основі.

Для оцінки ефективності методів маршрутизації з точки зору якості послуги використовуються такі показники:

- середня затримка передачі пакетів. Визначається як час, що минув з моменту відправлення пакета вузлом до моменту його отримання вузлом призначення, для всієї мережі в цілому за весь час роботи;

- частка втрачених пакетів для всієї мережі. Вимірюється як відсоток втрачених пакетів від загальної кількості відправлених пакетів за весь час роботи мережі;

- частка отриманих сеансів даних. Визначається у відсотках. Якщо метод маршрутизації не може знайти бажаний маршрут для передачі даних на основі якості послуги, він може відмовити у встановленні сеансу. Цей показник показує, який відсоток сесій було успішно прийнято. Його значення показує ефективність методу маршрутизації та якість зв'язку. Очевидно, що цей показник не можна застосовувати до методів, які прагнуть поліпшити налаштування якості обслуговування мережі в цілому;

- частка успішних сесій. Визначається у відсотках. Відображає відсоток програм, які були успішно оброблені після того, як метод маршрутизації встановив сеанс даних. Цей показник з точки зору кінцевого користувача може бути важливішим, ніж частка прийнятих сеансів передачі даних;

- загальна пропускна здатність мережі. Обсяг даних, що передаються всією мережею за одиницю часу;

- пропускна здатність вузла. Середня пропускна здатність, досягнута цим мережевим вузлом під час роботи. Метод маршрутизації повинен визначати поточну пропускну здатність каналу зв'язку та оцінювати його придатність для цього параметра;

- затримка виявлення маршруту. Середній час, що проходить між моментом, коли вузол вимагає встановлення сеансу, і моментом, коли протокол виконує цей сеанс;

- енергоефективність протоколу маршрутизації. Визначається як заряд акумулятора, витрачений на обробку та передачу одного пакета;

- нормалізоване навантаження маршрутизації. Визначає відсоток маршрутних контрольних пакетів серед усіх пакетів даних. Цей показник дає

можливість оцінити накладні витрати на маршрутизацію (передачу контрольних повідомлень);

- час відновлення маршруту. Ця метрика вказує час, що минув з моменту виходу з ладу або виходу одного з проміжних вузлів на маршруті, поки протокол маршрутизації не встановить обхідний маршрут для цього сеансу. Зазвичай характеризує стійкість протоколу маршрутизації до відмов мережі та можливість збалансувати навантаження.

Розробляючи BSM, необхідно знайти баланс між впровадженням якості обслуговування конкретних програм та енергоефективністю мережі в цілому.

Розробляючи метод маршрутизації для бездротової сенсорної мережі, розробникові часто доводиться вибирати між різними варіантами залежно від призначення та призначення мережі. Наприклад, важливо вибрати між пропускнуою здатністю мережі та затримкою передачі пакетів. У BSM ці фактори взаємовиключні. Якщо ви зменшите вимоги до затримки передачі пакетів, можна збільшити загальний обсяг трафіку, що передається мережею, збільшивши розмір пакета та зарезервувавши канали зв'язку на довший час. Крім того, ви можете використовувати наступний алгоритм маршрутизації, якщо програма не накладає ніяких обмежень на затримку передачі пакетів. Джерело може розділити пакети на один сеанс і відправити їх на різні сусідні вузли. Ці вузли, потрапляючи в область безпосередньої взаємодії з приймаючим вузлом, передають йому збережені пакети. Завдяки розподілу маршрутів досягається висока щільність передачі даних, але пакети можуть надходити із абсолютно різною затримкою. В якості іншої стратегії ви можете спробувати зменшити затримку передачі, якщо ви відправляєте пакети за декількома маршрутами одночасно. Але цей метод знижує ефективність використання пропускнуої здатності мережі в цілому, надсилаючи кілька копій одного пакета. Очевидно, що цей метод також призводить до збільшення споживання енергії для передачі повідомлень.

Тому, з точки зору бездротового сенсорного дизайну, метою оптимізації процесу маршрутизації є задоволення вимог якомога більшої кількості користувачів, тобто підвищення якості обслуговування для мережі в цілому або для окремих сеансів передачі даних .

Висновки до розділу 2

У цьому розділі розглядається маршрутизація в бездротових сенсорних мережах. Розглянуто основні варіанти зв'язку між вузлами мережі.

Ефективність бездротових сенсорних мереж багато в чому визначається вибором протоколів маршрутизації пакетів. При проектуванні BSM необхідно прагнути до зменшення та вирівнювання навантаження на вузли, що досягається за допомогою протоколу маршрутизації.

Є дві основні задачі маршрутизації:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів;
- завдання маршрутизації для забезпечення максимального терміну служби мережі.

Залежно від призначення, розміру та технічних характеристик, бездротові сенсорні мережі широко відрізняються своїми обмеженнями та характеристиками, що слід враховувати при розробці протоколу маршрутизації. Основні показники протоколів маршрутизації:

- кількість проміжних вузлів;
- енергоефективність;
- надійність;
- необхідна якість обслуговування.

Детально аналізуються фактори, що впливають на якість передачі інформації та мережеві ресурси, необхідні для її покращення. Оскільки більшість методів маршрутизації прагнуть поліпшити лише один із показників якості обслуговування, наприклад середню затримку передачі

пакетів або загальну пропускну здатність мережі. Поліпшення декількох показників одночасно, негативно впливає на інші параметри та збільшує енергоспоживання. Тому при розробці BSM існує завдання оптимізації ресурсів, щоб знайти баланс між покращенням ключових параметрів та енергоефективністю мережі в цілому.

3. ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Парадигми алгоритмів у безпроводових сенсорних мережах

Програми датчиків вимагають зв'язку вузлів для виконання певних процедур або алгоритмів. Насправді в бездротових сенсорних мережах можна виконати три типи алгоритмів:

- **Централізовані алгоритми:** Вони виконуються у вузлі, що володіє знаннями всієї мережі. Ці алгоритми досить рідкісні через вартість передачі даних, щоб вузол знав стан всієї мережі.
- **Розподілені алгоритми:** Зв'язок підтримується передачею повідомлень.
- **Локальні алгоритми:** Вузли використовують обмежені дані, отримані з близької області. За допомогою цієї локальної інформації алгоритм виконується в одному вузлі.

Парадигма алгоритму є важливим фактором, який слід враховувати при прийнятті рішення про використання протоколу маршрутизації в мережі. Якщо використовуються локалізовані алгоритми, протокол маршрутизації повинен посилити та оптимізувати зв'язок між сусідами. З іншого боку, для централізованих алгоритмів поєднання повідомлень, які одночасно йдуть у центральний вузол (навіть коли вони генеруються з різних джерел), може бути перевагою. Розподілені алгоритми повинні ефективно підтримувати зв'язок між будь-якими двома парами вузлів. Нарешті, локальні алгоритми залежать від якогось рішення, яке забезпечує географічні координати, наприклад GPS, що робить рішення дорожчим.

3.2 Обмеження безпроводових сенсорних мереж

Через зменшення обчислювальних, радіо- та акумуляторних ресурсів датчиків, протоколи маршрутизації в бездротових сенсорних мережах повинні відповідати таким вимогам:

- Автономність: припущення про виділений блок, який керує радіо та ресурсами маршрутизації, не існує у бездротових сенсорних мережах, оскільки це може бути легкою точкою атаки. Оскільки не буде жодного централізованого об'єкта, який би приймав рішення про маршрутизацію, процедури маршрутизації передаються на вузли мережі.
- Енергоефективність: протоколи маршрутизації повинні продовжити термін служби мережі, зберігаючи при цьому хороший рівень підключення, щоб забезпечити зв'язок між вузлами. Важливо зазначити, що заміна батареї в датчиках є неможливою, оскільки більшість датчиків розміщуються випадковим чином. За деяких обставин датчики навіть недоступні. Наприклад, у бездротових підземних сенсорних мережах деякі пристрої поховані, щоб вони могли відчувати ґрунт [6].
- Масштабованість: Бездротові сенсорні мережі складаються з сотні вузлів, тому протоколи маршрутизації повинні працювати з такою кількістю вузлів.
- Стійкість: датчики можуть непередбачувано припинити роботу через екологічні причини або через споживання батареї. Протоколи маршрутизації повинні справлятися з цією можливістю, тому, коли поточний вузол виходить з ладу, може бути виявлений альтернативний маршрут.
- Неоднорідність пристроїв: Хоча більшість цивільних застосувань бездротової сенсорної мережі покладаються на однорідні вузли, впровадження різних видів датчиків може дати значні переваги. Використання вузлів з різними процесорами, трансиверами, блоками живлення або сенсорними компонентами може покращити характеристики мережі. Серед іншого, масштабованість мережі,

відведення енергії або пропускна здатність є потенційними кандидатами на отримання вигоди від неоднорідності вузлів [7].

- Адаптованість до мобільності: Різні програми бездротових сенсорних мереж можуть вимагати від вузлів, щоб справлятися зі своєю власною мобільністю, мобільністю раковини або мобільністю події, щоб відчувати. Протоколи маршрутизації повинні надавати відповідну підтримку цим рухам.

3.3 Класифікація протоколів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах

Беручи до уваги їх процедури, протоколи маршрутизації можна приблизно класифікувати згідно з наступними критеріями.

3.3.1. Роль ієрархії вузлів у мережі

У плоских схемах усі вузли датчиків беруть однакову роль у процедурах маршрутизації. З іншого боку, ієрархічні протоколи маршрутизації класифікують вузли датчиків відповідно до їх функціональних можливостей [8]. Потім мережа ділиться на групи або кластери. У групі вибирається лідер або керівник кластера для координації діяльності всередині кластера та для зв'язку з вузлами поза власним кластером. Розмежування вузлів може бути статичним або динамічним.

3.3.2. Модель передачі даних

Залежно від програми, збір даних та взаємодія в бездротових сенсорних мережах може здійснюватися кількома способами. Модель доставки даних вказує на потік інформації між вузлами датчика та раковиною [7]. Моделі доставки даних поділяються на такі класи: безперервні, керовані подіями, керовані запитами або гібридні. У безперервній моделі вузли періодично передають інформацію, яку їх датчики виявляють із заздалегідь заданою

швидкістю. На відміну від них, підходи, керовані запитами, змушують вузли чекати, коли їх вимагатимуть, щоб повідомити про свої сприйняті дані. У моделі, керованій подіями, датчики видають зібрані дані, коли відбувається подія, що цікавить. Нарешті, гібридні схеми поєднують попередні стратегії, тому датчики періодично інформують про зібрані дані, але також відповідають на запити. Крім того, вони також запрограмовані на інформування про цікаві події.

3.4 Методи оптимізації маршрутизації в бездротових сенсорних мережах

Особливі характеристики бездротових сенсорних мереж та їх обмеження спонукали до необхідності конкретних вимог до протоколів маршрутизації. У порівнянні з протоколами маршрутизації мобільних спеціальних мереж, алгоритми в бездротових сенсорних мережах зазвичай реалізують такі специфікації:

3.4.1 На основі атрибутів

У цих алгоритмах Приймач надсилає запити до певних регіонів і чекає відповіді від датчиків, розташованих у цій області. За схемою атрибут-значення, запити інформують про необхідні дані. Вибір атрибутів залежить від програми. Важливою характеристикою цих схем є те, що вміст повідомлень даних аналізується в кожному стрибку для прийняття рішення про маршрутизацію.

3.4.2. Енергоефективність

Кілька маршрутів можуть зв'язувати вузол і приймач. Метою енергозберігаючих алгоритмів є вибір тих маршрутів, які, як очікується, дозволять збільшити термін служби мережі. Для цього переважними є маршрути, що складаються з вузлів з вищими енергетичними ресурсами.

3.4.3. Агрегація даних

Дані, зібрані в датчиках, походять від загальних явищ, тому вузли в близькій зоні, як правило, передають схожу інформацію. Шляхом зменшення споживання енергії є агрегування даних. Агрегація складається з придушення надмірності в різних повідомленнях даних. Коли придушення досягається деякими техніками обробки сигналів, ця операція називається злиттям даних.

3.4.4. Схема адресації

Бездротові сенсорні мережі утворені значною кількістю вузлів, тому присвоєння унікальних ідентифікаторів вручну неможливо. Використання MAC-адреси або координат GPS не рекомендується, оскільки це створює значне корисне навантаження [3]. Однак унікальні адреси для всієї мережі не потрібні для ідентифікації вузла призначення конкретного пакета в бездротових сенсорних мережах. Насправді адресація на основі атрибутів краще відповідає особливостям бездротових сенсорних мереж. У цьому випадку для визначення кінцевого пункту призначення використовується такий атрибут, як розташування вузла та тип датчика. Щодо цих ідентифікаторів було запропоновано два різні підходи [3]. По-перше, схема повторного використання ідентифікаторів дозволяє повторювати ідентифікатори в мережі, але зберігаючи їх унікальність у близьких районах. Таким чином, вузол знає, що його ідентифікатор унікальний в районі k -hop, будучи k параметром для налаштування. З іншого боку, загальнопольові схеми унікальних ідентифікаторів гарантують унікальність ідентифікаторів у цілому додатку. З цим припущенням можна одночасно використовувати інші протоколи, такі як маршрутизація, MAC або конфігурації мережі.

3.4.5. Місцезнаходження

Коли використовується цей прийом, вузол визначає шлях передачі відповідно до локалізації кінцевого пункту призначення та позицій деяких інших вузлів у мережі.

3.4.6. Багатопроменеве спілкування

За допомогою цієї техніки вузли використовують кілька шляхів від початку до пункту призначення в мережі. Оскільки багатопроменева комунікація призначена для підвищення надійності та продуктивності мережі, ці шляхи не повинні мати спільного зв'язку. Багатопроменевий зв'язок може бути здійснений двома способами. По-перше, один шлях встановлюється як активна маршрутизація зв'язку, тоді як інші шляхи зберігаються для майбутніх потреб, тобто коли поточний активний шлях порушений. З іншого боку, також можна розподілити трафік між безліччю шляхів.

3.4.7. Якість обслуговування

Бізнес мережевих додатків та його функціональні можливості вимагають забезпечення якості обслуговування (QoS) при обміні даними. Зокрема, часто потрібна ефективна частота дискретизації, обмежена затримка та тимчасова точність. Задовольнити їх неможливо для всіх протоколів маршрутизації, оскільки вимоги можуть бути протилежними принципам протоколу. Наприклад, протокол маршрутизації може бути розроблений для продовження терміну служби мережі, тоді як програма може вимагати ефективної частоти дискретизації, яка змушує періодичні передачі та, в свою чергу, періодичне споживання енергії.

3.5 Застосування методів оптимізації: протоколи маршрутизації

За допомогою репрезентативних протоколів маршрутизації ми представляємо, як засновані на атрибутах, географічні та багатопроменеві методи зазвичай застосовуються в бездротових сенсорних мережах. Хоча ієрархія зазвичай вважається параметром для класифікації протоколів, ми вивчимо її як важливий прийом, що використовується в протоколах маршрутизації, а отже, ми також проаналізуємо деякі репрезентативні протоколи ієрархічної маршрутизації.

3.5.1. Протоколи маршрутизації на основі атрибутів або орієнтованих на дані

У цій категорії виділяються такі протоколи:

3.5.1.1. SPIN (Протоколи датчиків для отримання інформації за допомогою переговорів)

У роботі «Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks» автори представляють сімейство адаптивних протоколів, що називаються SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), які ефективно поширюють інформацію серед датчиків в енергообмеженій бездротовій сенсорній мережі. Вузли, на яких запущений протокол зв'язку SPIN, називають свої дані за допомогою дескрипторів даних високого рівня, які називаються метаданими. Вони використовують переговори про метадані, щоб виключити передачу надлишкових даних по всій мережі. Крім того, вузли SPIN можуть базувати свої комунікаційні рішення як на конкретних додаткових знаннях даних, так і на знанні доступних їм ресурсів. Це дозволяє датчикам ефективно розподіляти дані при обмеженому енергопостачанні. Були змодельовані та проаналізовані чотири специфічні протоколи SPIN: SPIN-PP та SPIN-EC, які оптимізовані для мережі точка-точка, та SPIN-BC та SPIN-RL, які оптимізовані для широкомовної мережі.

У мережах "точка-точка" відправник повідомляє про наявність нових даних із рекламним повідомленням до кожного сусіда. Коли сусід отримує повідомлення, вузол перевіряє метадані, щоб дізнатись, чи він уже зберігає елемент даних. Якщо сусід цікавиться інформацією, він відповідає повідомленням із запитом. Отримавши її, відправник передає інформацію в повідомленні даних. Сусід, який отримує дані, повідомляє про їх наявність власним сусідам з рекламним повідомленням. Потім протокол трьох рукоштовань повторюється. Описаний процес відомий як SPIN-PP. Алгоритм SPIN-EC вводить у вузли техніку, тому, коли їх поточні

енергетичні ресурси не перевищують заданий поріг, що дозволяє їм виконати три протоколи рукостискання, вони не беруть участі в процесі. Варіанти SPIN-BC та SPIN-RL розширюють алгоритм для підтримки широкомовних передач. Таким чином, одне рекламне повідомлення може дістатись до усіх сусідів. У цьому випадку сусіди не відразу відповідають повідомленням із запитом, але вони повинні чекати випадковий час. Для оптимізації процесу вузол, відмінний від рекламного, скасовує власне повідомлення про запит, коли виявляє інше подібне повідомлення. Враховуючи широкомовну передачу, рекламний вузол також відповідає лише одним повідомленням даних, навіть коли він отримав кілька повідомлень запиту. Крім того, SPIN-RL включає деякі функції надійності. Зокрема, вузли відстежують рекламні повідомлення, які вони отримують, та їх відповідні ініціатори. Якщо вони відправляють повідомлення із запитом, але вузол, що повідомляє, не відповідає через заданий інтервал, вузол знову запитує дані із повідомленням про запит.

Порівнюючи протоколи SPIN з іншими можливими підходами, протоколи SPIN можуть доставити на 60% більше даних для даної кількості енергії, ніж звичайні підходи в точковій мережі та на 80% більше даних для заданої кількості енергії в широкомовній мережі. Крім того, що стосується швидкості розповсюдження та використання енергії, протоколи SPIN працюють близько до теоретичного оптимуму як в точці, так і в мережах мовлення. Однією з головних переваг цих протоколів є те, що вузли повинні знати лише його сусідство з 1 стрибком.

3.5.1.2. Спрямована дифузія

Як протокол, орієнтований на дані, програми в датчиках позначають дані за допомогою пар атрибут-значення. Вузол, що вимагає даних, генерує запит, де відсоток задається відповідно до схеми на основі атрибуту-значення, визначеної додатком. Приймач зазвичай вводить інтерес до мережі для кожного завдання програми [10]. Вузли оновлюють внутрішній кеш

інтересів отриманими повідомленнями про інтереси. Вузли також зберігають кеш даних, де зберігаються останні повідомлення даних. Ця структура допомагає визначити швидкість передачі даних. Отримавши це повідомлення, вузли встановлюють відповідне посилання на ініціатора інтересу. Це посилання називається градієнтом, і воно характеризується швидкістю передачі даних, тривалістю та часом закінчення. Крім того, вузол активує свої датчики для збору передбачуваних даних. Прийом повідомлення про інтерес змушує вузол встановлювати кілька градієнтів (або перший стрибок у маршруті) до раковини. Для того, щоб визначити оптимальний градієнт, використовуються позитивні та негативні підкріплення. Там алгоритм працює з двома типами градієнтів: дослідницьким та градієнтами даних. Дослідницькі градієнти призначені для встановлення та ремонту маршруту, тоді як градієнти даних використовуються для надсилання реальних даних.

3/5.1.3. Чутки

У цьому алгоритмі запити, генеровані раковиною, розповсюджуються серед вузлів, які спостерігали подію, пов'язану із запитами [11]. Для цього вузол, який спостерігає за подією, вводить довговічний пакет, який називається агент. Агенти поширюються в мережі, тому віддалені вузли знають про те, які вузли сприйняли певні події. Для оптимізації поведінки агентів, коли агент досягає вузла, який виявив іншу подію, агент все ще пересилається, але агрегує нову виявлену подію. Крім того, агенти ведуть список нещодавно відвіданих вузлів, тому циклів частково уникають.

При прийомі агентів вузли можуть отримувати оновлену інформацію про події в мережі. Ці знання відображаються в кешах подій вузла. Використовуючи кеш подій, вузол може зручно надсилати повідомлення із запитом. Однак деякі вузли можуть не знати про ініціатора події. За цих обставин запит послідовно поширюється до одного із сусідів, вибраних випадковим чином. Як тільки запит надходить до вузла із записом,

пов'язаним із запитуваною подією, у кеші подій, запит потім пересилається через вивчений шлях. Дотримуючись цієї процедури, вартість заповнення мережі запитом явно знижується.

3.5.1.4. COUGAR

Згідно з цим підходом, мережа передбачається як розподілена база даних, де деякі вузли, що містять інформацію, тимчасово недоступні [12]. Оскільки вузол зберігає історичні значення, мережа поводить себе як сховище даних. Крім того, варто зазначити, що погані умови розповсюдження можуть призвести до зберігання помилкової інформації у вузлах. Беручи до уваги цю обставину, COUGAR надає SQL-подібний інтерфейс, розширений для включення деяких пунктів для моделювання розподілу ймовірностей. Приймач відповідає за генерацію плану запиту, який надає підказки щодо вибору спеціального вузла, який називається ведучим. Керівники мережі виконують агрегування та передають результати в приймач.

3.5.1.5. ACQUIRE (активне пересилання запитів у сенсорних мережах)

Цей алгоритм [13] також розглядає бездротову сенсорну мережу як розподілену базу даних. У цій схемі вузол вводить активний пакет запитів у мережу. Сусідні вузли, які виявляють, що пакет містить застарілу інформацію, видають на вузол повідомлення про оновлення. Потім вузол випадковим чином вибирає сусіда для поширення запиту, який повинен його вирішити. По мірі просування активного запиту через мережу він поступово розбивається на дедалі менші компоненти, поки не буде повністю вирішений. Потім запит повертається назад до вузла запиту як завершена відповідь.

3.5.2. Протоколи географічної маршрутизації

Ці алгоритми використовують інформацію про місцезнаходження, щоб зробити методики маршрутизації більш ефективними. Зокрема, сусіди

обмінюються інформацією про своє місцезнаходження, тому коли вузлу потрібно переслати пакет, він відправляє його сусіду, який, як вважається, є найближчим до кінцевого пункту призначення. Для роботи джерело вставляє координати пункту призначення в пакети. Інформація про місцезнаходження, що використовується в географічних алгоритмах, може бути отримана з конкретних пристроїв, таких як GPS, або вона може моделюватися за допомогою віртуальних координат.

Що стосується географічних протоколів, геотрансляція - це процес, за допомогою якого пакет доставляється до вузлів, розміщених у певній області. Цей примітив особливо підходить для бездротових сенсорних мереж, оскільки Приймач зазвичай вимагає інформації від вузлів, що знаходяться в зоні. Зона може бути статично визначена вихідним вузлом або може бути побудована динамічно за допомогою ретрансляційних вузлів, щоб уникнути деяких вузлів, які можуть спричинити об'їзд.

З іншого боку, в географічних механізмах зустрічі географічні місця використовуються як місце зустрічі для постачальників та шукачів інформації. Механізми randevu на основі географії можуть бути використані як ефективний засіб для пошуку місця розташування та пошуку ресурсів, на додаток до розповсюдження даних та доступу до бездротових сенсорних мереж [15]. Найпопулярнішими методами пересилання в протоколах географічної маршрутизації є:

3.5.2.1. Жадібні алгоритми

Згідно з цим підходом, вузол приймає рішення про шлях передачі на основі положення своїх сусідів. Для продовження джерело порівнює локалізацію пункту призначення з координатами сусідів. Потім він передає повідомлення сусідові, який знаходиться найближче до кінцевого пункту призначення. Процес повторюється доти, доки пакунок не досягне призначеного пункту призначення. Для цього контексту було запропоновано

кілька метрик, пов'язаних з поняттям близькості. Серед них найпопулярнішими показниками є евклідова відстань та проектована лінія, що з'єднує вузол ретрансляції та пункт призначення.

З цією стратегією процеси затоплення обмежуються одноразовим стрибком, і мережа здатна ефективно адаптуватися до топологічних змін. Це просте правило пересилання модифікується відповідно до надійності посилянь у [16]. У цій пропозиції ненадійні сусіди не беруться до уваги при повторних передачах. З іншого боку, географічна інформація також використовується в SPEED (протокол без громадянства для наскрізної затримки) для оцінки затримки переданих пакетів [17].

Подібно до цього алгоритму, жадібний алгоритм із технікою переадресації „найбільш вперед-у-R” вибирає наступним стрибком найвіддаленішого сусіда власника пакета, який знаходиться ближче до кінцевого пункту призначення [7]. На відміну від цього, "найближчий-прямий процес" вибирає найближчого сусіда, який знаходиться ближче до передбачуваного пункту призначення, як наступний вузол передачі.

Основним обмеженням жадібних алгоритмів є те, що передача може не вдатися, коли поточний власник повідомлення не має ближчих сусідів до пункту призначення, ніж він сам. Це може статися навіть тоді, коли існує цілком здійснений шлях між двома крайнощами, наприклад, коли є перешкода. Для подолання цього недоліку пропонується правило «правої руки» [18].

3.5.2.2. GAF (географічна адаптивна вірність)

Цей протокол спрямований на оптимізацію роботи бездротових сенсорних мереж шляхом виявлення еквівалентних вузлів щодо переадресації пакетів [19]. Два вузли вважаються еквівалентними, коли вони підтримують однаковий набір сусідніх вузлів, і тому вони можуть належати до одних і тих же шляхів зв'язку. Джерело та пункт призначення у програмі

виключаються з цієї характеристики. Для ідентифікації еквівалентних вузлів необхідні їх положення. Крім того, побудована віртуальна сітка. Ця сітка утворена клітинками, розмір яких дозволяє стверджувати, що всі вузли в одній комірці можуть безпосередньо взаємодіяти з вузлами, що належать сусіднім коміркам, і навпаки. Таким чином, вузли в комірці еквівалентні.

Вузли ідентифікують еквівалентні вузли шляхом періодичного обміну повідомленнями про виявлення з вузлами в їх комірках. За допомогою інформації, що міститься в цих повідомленнях, вузли узгоджують, який саме підтримуватиме комунікацію. Інші вузли залишаються вимкненими. За допомогою цієї процедури зберігається вірність маршрутизації, тобто існує безперебійне з'єднання між вузлами зв'язку. Однак обраний вузол періодично обертається для справедливого споживання енергії. Для цього вузли періодично прокидаються.

3.5.3. Ієрархічні протоколи маршрутизації

Основною метою ієрархічної маршрутизації є зменшення споживання енергії шляхом класифікації вузлів у кластери. У кожному кластері вузол вибирається в якості лідера або головки кластера. Різні схеми ієрархічних маршрутів в основному відрізняються тим, як обрано головку кластера та як поводяться вузли в міждоменному та внутрішньокластерному домені.

3.5.3.1. LEACH (Адаптивна ієрархія кластеризації з низьким енергоспоживанням)

У LEACH роль глави кластера періодично передається між вузлами мережі з метою розподілу споживання енергії. Ефективність LEACH базується на раундах. Потім у кожному турі обирається керівник кластеру. Для цих виборів використовується кількість вузлів, які не були головками кластера, та відсоток головок кластера. Як тільки головка кластера визначена на етапі налаштування, вона встановлює розклад TDMA для передач у своєму кластері [20]. Це планування дозволяє вузлам вимикати свої

інтерфейси, коли вони не будуть використовуватися. Головка кластера є маршрутизатором до раковини, а також відповідає за агрегування даних. Оскільки головка кластера управляє датчиками, розташованими в тісній зоні, агрегування даних, виконане цим лідером, дозволяє усунути надмірність.

Централізованою версією цього протоколу є LEACH-C [21]. Ця схема також базується на тимчасових раундах, які поділяються на фазу налаштування та стійку фазу. На етапі налаштування датчики інформують базову станцію про їх положення та рівень енергії. З цією інформацією базова станція приймає рішення про структуру кластерів та відповідних головок кластерів. Оскільки базова станція володіє повними знаннями про стан мережі, структура кластера, отримана в результаті LEACH-C, вважається оптимізацією результатів LEACH.

3.5.3.2. PEGASIS (Енергоефективний збір в сенсорних інформаційних системах)

Вважається оптимізацією алгоритму LEACH. Замість класифікації вузлів у кластери, алгоритм формує ланцюжки вузлів датчиків. Виходячи з цієї структури, кожен вузол передає та приймає лише від одного найближчого вузла своїх сусідів. З цією метою вузли регулюють потужність своїх передач [22]. Вузол виконує агрегування даних і пересилає йому вузол в ланцюжку, який зв'язується з раковиною. У кожному раунді обирається один вузол в ланцюжку для зв'язку з раковиною. Ланцюжок побудований з жадібним алгоритмом.

3.5.3.3. TEEN (пороговий чутливий енергоефективний сенсорний мережевий протокол)

TEEN [23] - це інший ієрархічний протокол для реактивних мереж, який негайно реагує на зміни відповідних параметрів. У цьому протоколі кластерна головка (CH) надсилає жорстке порогове значення та м'яке. Вузли постійно відчують своє оточення. Коли параметр із набору атрибутів

вперше досягає свого жорсткого порогового значення, вузол вмикає передавач і надсилає свої дані. Потім вузли передають дані в поточному періоді кластера, якщо виконуються наступні умови: поточне значення сприйманого атрибуту більше жорсткого порогу, а поточне значення сприйманого атрибуту відрізняється від сприйнятого значення на величину, що дорівнює або більше ніж м'який поріг. Обидві стратегії спрямовані на зменшення витрат енергії на передачу повідомлень.

Основним недоліком цієї схеми є те, що, якщо порогові значення не досягнуті, вузли ніколи не будуть спілкуватися; користувач взагалі не отримуватиме даних із мережі і не дізнається, навіть якщо всі вузли загинуть. Таким чином, ця схема погано підходить для додатків, де користувачеві необхідно регулярно отримувати дані.

3.5.3.4. DirQ (спрямоване розповсюдження запитів)

DirQ [24] націлений на оптимізацію поширення запитів у бездротовій сенсорній мережі. Основна мета полягає в тому, що запити просто розповсюджуються за мінімальною кількістю вузлів, які забезпечують надходження запитів до вузлів, здатних обслуговувати запит. Для цього в мережі обмінюється певною інформацією. Періодичність повідомлень про оновлення залежить від швидкості зміни фізичних параметрів, які визначає мережа. Потім кожен вузол автономно підтримує свій власний поріг (δ). Якщо вузол датчика має значення V бажаного параметра, а наступний період вимірювання отримує однакове або подібне значення в інтервалі між $(\delta - V, V + \delta)$, тоді він вирішує нічого не відправляти на потоп. Однак, якщо Приймач не отримує жодного повідомлення від конкретного вузла, тоді він припускає, що цей вузол має виміряне значення, яке не сильно змінилося від того, що повідомлялося нещодавно. Щоб забезпечити точну доставку програм, усі мережеві вузли повинні мати можливість зберігати інформацію, що може вважатися недоліком залежно від кількості інформації, що

зберігається в топології, і кількості вузлів. DirQ - це протокол, придатний для ситуацій, коли кількість запитів велика і час передачі запитів відомий.

3.5.4. Протоколи багатопроменевої маршрутизації

У цих протоколах джерело знає кілька шляхів до пункту призначення. Маршрути можуть використовуватися одночасно або один з них може бути активним, поки інші підтримуються для майбутніх потреб.

3.5.4.1. SAR (маршрутизація послідовного призначення)

SAR [25] - один із перших протоколів для бездротових сенсорних мереж, що забезпечує поняття критеріїв маршрутизації QoS. Він базується на прив'язку рівня пріоритету до кожного пакета. Крім того, посилення та маршрути пов'язані з показником, який характеризує їх потенційне забезпечення якості обслуговування. Ця метрика базується на затримці та витратах енергії. Потім алгоритм створює дерева, що кореняться у сусідів раковини, що стрибають у одній хмелі. Для цього враховуються декілька параметрів, таких як пріоритет пакетів, енергетичні ресурси та показники якості обслуговування. Протокол повинен періодично перераховувати маршрути, які слід підготувати у разі виходу з ладу одного з активних вузлів.

3.5.4.2. Максимальна тривалість маршрутизації в бездротових сенсорних мережах

Цей алгоритм поєднує оптимізацію споживання енергії з використанням декількох маршрутів [26]. У цьому алгоритмі контролюється активний маршрут (який також називають основним), щоб контролювати його залишкову енергію. Тим часом можна виявити інші маршрути. Якщо залишкова енергія активного маршруту не перевищує енергії альтернативного маршруту, тоді використовується відповідний вторинний шлях.

3.5.4.3. Маршрутизація з урахуванням енергії в бездротових сенсорних мережах

Після виявлення декількох шляхів цей алгоритм пов'язує ймовірність використання з кожним маршрутом [27]. Ця ймовірність пов'язана із залишковою енергією вузлів, що утворюють маршрут, але враховується також вартість передачі через цей маршрут.

3.5.4.4. M-MPR (багатопроточна маршрутизація сітки)

Цей протокол представляє два режими роботи [28]. По-перше, у неперервному MPR (D-MPR) із селективним пересиланням кожен пакет аналізується окремо джерелом, і він направляється за різними маршрутами. По-друге, D-MPR із реплікацією даних базується на одночасному випуску безлічі копій одного і того ж пакету різними маршрутами. Зокрема, усі відомі маршрути, що повідомляють джерело та пункт призначення, поширюють пакет. Для виявлення маршруту обмінюється інформацією про положення вузлів та про їх залишкову енергію.

3.5.5. Порівняння

Ієрархічні та географічні протоколи маршрутизації вважаються масштабованими рішеннями. Ведення ієрархічної структури вимагає координат вузлів за допомогою переданих повідомлень. У цільних мережах використання кластерної структури компенсує цю вартість. Однак ця вигода не діє в невеликих мережах. Подібна поведінка спостерігається для географічних підходів. Коли мережа складається із значної кількості вузлів у розширеній зоні, обмін повідомленнями для встановлення місцезнаходження сусідів стає незначним порівняно зі скороченням передач, яке досягає географічний алгоритм. У цих двох підходах топологія мережі повинна бути стабільною. Навпаки, структура кластера та географічна інформація повинні

часто оновлюватися, що призводить до додаткових витрат. Наприклад, у стабільних мережах PEGASIS зазвичай ефективніший, ніж LEACH. Однак побудова ланцюгів у PEGASIS може призвести до значного споживання ресурсів у високодинамічних топологіях.

Методи, що базуються на атрибутах, стають актуальними, коли дані, що сприймаються вузлами, зазвичай не представляють інтересу для решти вузлів. За цих обставин алгоритми можуть значно зменшити накладні витрати на мережу. Рішення щодо того, який алгоритм слід вибрати, головним чином залежить від моделі доставки даних, яку змушує додаток. Коли спілкування повинно ініціюватися подіями, SPIN є найбільш підходящим алгоритмом на основі атрибутів. Однак спрямована дифузія, чутки, COUGAR та ACQUIRE - це протокол, керований запитом. Вони приблизно відрізняються тим, як розповсюджується та вирішується запит у мережі.

Що стосується протоколів багатопроменевої маршрутизації, їх основний недолік полягає у вартості утримання шляхів. Ця вартість включає ресурси пам'яті, а також накладні витрати на мережу. Тому вони не підходять для мереж, критично обмежених через зменшення заряду акумуляторів. Однак вони стають необхідними, коли надійність є серйозною вимогою в прикладному бізнесі.

Висновки до розділу 3

В даному розділі була розглянута класифікація протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах за трьома основними критеріями:

- способом організації мережі;
- способом дослідження маршруту;
- принципом роботи протоколу.

Була проведена 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 місцезнаходження вузлів.

Було детально проаналізовано принцип роботи наступних протоколів: SPIN, DD, RR, GBR, OLSR, AODV, LEACH, PEGASIS, GAF, GEAR. Розглянуті особливості їх використання в залежності від призначення мережі. Проведено порівняльний аналіз протоколів за різноманітними показниками, на основі якого можна зробити висновок, що кожен із протоколів буде оптимальним лише для певної мережі, в той час, як для мережі з іншою кількістю та розміщенням вузлів, використання цього протоколу є неефективним або взагалі неможливим. Проте, для багатьох протоколів існують оптимізовані версії з меншими енерговитратами, але і гіршими показниками якості обслуговування. Але якщо при функціонування мережі не накладається жорстких вимог до якості обслуговування, доцільніше використовувати енергоефективні протоколи маршрутизації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У моїй дипломній роботі розглянуто розвиток способів маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах.

Поставлена мета роботи досягнена, а отримані результати відповідають сформульованим завданням та задовольняють їх.

Для досягнення поставленої мети були вирішенні наступні задачі:

- 1) У першому розділі було детально розглянуто особливості функціонування безпроводових сенсорних мереж.

Безпроводова сенсорна мережа – розподілена, самоорганізуюча і стійка до відмови мережа з великою кількістю автономних електронних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями і ретранслювати їх по безпроводному каналу зв'язку.

Основні переваги безпроводових сенсорних мереж:

- відсутність необхідності в прокладанні кабелів для електроживлення і передачі даних;
- низька вартість монтажу і технічного обслуговування системи;
- зручність розміщення автономних безпроводових вузлів в різноманітних точках простору;
- можливість впровадження і модифікації мережі на експлуатуємому об'єкті при мінімальному втручанні в процес його функціонування;
- надійність і відмовостійкість всієї системи в цілому при виході з ладу окремих вузлів або при порушенні зв'язку між ними.

Завдяки практичності, багатофункціональності, дешевизні та можливості функціонувати у віддалених регіонах з поганими кліматичними умовами, БСМ набули широкого застосування у різноманітних сферах.

- 2) У другому розділі розглядався процес маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах. Були наведені параметри, покращення яких

досягається вибором оптимального способу маршрутизації, з використанням доступних ресурсів мережі.

Основні задачі маршрутизації:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів;
- завдання маршрутизації із забезпеченням максимальної тривалості життя мережі.

Маршрутизація дозволяє покращити тільки декілька необхідних показників, які безпосередньо впливають на якість і швидкість передачі інформації та ефективність використання обладнання, за рахунок погіршення менш значущих параметрів для даної конкретної мережі.

Тому вибір способу маршрутизації для кожної мережі є індивідуальним і залежить від її призначення, розмірів, розміщення вузлів та технічних можливостей обладнання.

- 3) В третьому розділі досліджена класифікація протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Детально описаний алгоритм роботи таких протоколів, як SPIN, DD, RR, GBR, OLSR, AODV, LEACH, PEGASIS, GAF, GEAR. Всі розглянуті протоколи маршрутизації широко використовуються у БСМ і є базовими протоколами з можливістю подальшої оптимізації та модифікації. Проаналізована доцільність їх використання в залежності від специфічних особливостей конкретної мережі. Виконано порівняльний аналіз ефективності протоколів. Наведені переваги та недоліки кожного з розглянутих протоколів маршрутизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008.-328с.,іл.
2. Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: НПП "Издательство "Наукова думка" НАН Украины", 2008. – 580 с.
3. О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, І.С. Романченко. Математичні моделі та інформаційні технології оцінки і прогнозування стану природного середовища випробувальних полігонів. моногр. - К.: МО України. ЦНДІ ЗС України, 2009. ISBN 978-966-655-498-0
4. Основи теорії телекомунікацій /Підручник / За заг. ред. проф. Ільченка М.Ю. – К.: 2010. – ІССЗІ НТУУ «КПІ» – с.786, іл.
5. Бунин С.Г., Войтер А.П., Ільченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети с сверхширокополосными импульсными радиосигналами. – Киев, Наукова Думка, 2012
6. Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новиков В.І., Тачинін О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. Київ: НАУ, 2016 р., с. 397 ISBN 978-966-932-011-7 УДК 629.735.067(02)ББК 052-082
7. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Наукова думка, 2017. – 730 с
8. 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
9. Лисенко А.И., Чумаченко С.М., Шевченко В.Л. Математические модели и информационные технологии за оценка и прогнозиране състоянието на

- околната среда в изпитателни полигони. Издател: Про Лангс, език: Български. – 2017 р. ISBN 978-954-2995-29-6
10. М.З.Згуровський, М.Ю.Ільченко, Є.А.Якорнов. Організація наукових досліджень в галузі телекомунікацій. – К.: Хімджест, 2018. – 336 с.
 11. 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 КПП ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2
 12. Поширення радіохвиль в зоні покриття безпроводових мереж зв'язку. Теоретичні основи та приклади розв'язання задач [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. О. Кравчук, Л. О. Афанасьєва, Д. А. Міночкін, І. М. Кравчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,4 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 107 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36935>)
 13. Лисенко О.І. Конспект лекцій: „Digital automatic control systems for information communications engineers”. UNESCO UNITWIN OCW/OER Initiative is a grant program led by the Korean UNESCO UNITWIN Host, Handong Global University, and sponsored by the Korean Ministry of Education. Посилання на корейський сайт <http://www.uuooi.org/english/viewforum.php?f=685> <http://www.uuooi.org/english/viewforum.php?f=293>
 14. S. Lindsey, C. Raghavendra, “PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems”, IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2016, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.
 15. V. Rodoplu and T. H. Meng, “Minimum Energy Mobile Wireless Networks”, IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 8, Aug. 1999, pp. 1333-1344.

16. Geographic routing without location information / A. Rao [et al.] // Proceedings of the 9th annual international conference on mobile computing and networking. San Diego (USA), 2003. P. 96-108.
17. Roychowdhury, S. Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing / S. Roychowdhury, C. Patra // International Journal of Computer and Communication Technology (IJCCT) for International Conference on Advances in Computer, Communication Technology and Applications (ACCTA-2010) (August 2010). – 2010. – V. 1, № 2–4. – P. 309–313.
18. Schurgers, C. Energy Efficient Routing in Sensor Networks / C. Schurgers, M. Srivastava // The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean VA, 2001. – P. 357–361.
19. 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.