

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ
(підпис) (Ім'я, прізвище)

“4” червня 2020_р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”
(назва ОС)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

на тему: Розвиток алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах

Виконав студент 4 курсу, групи ТМ-61
(шифр групи)

_____ Штойко Олександр Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ ст. викладач Петрова В.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Стан питання і постановка задачі; Методика та алгоритм порівняльного аналізу БСМ; Програмування вибору алгоритму маршрутизації за допомогою імітаційного моделювання БСМ
(назва розділу)

_____ д.т.н., професор, Лисенко О.І. _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доц.каф. телекомунікаційних систем Мошинська А.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва)

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ
(підпис) (ім'я, прізвище)

“ 22 ” січня 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Штойко Олександр Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розвиток алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах.

керівник роботи Петрова Валентина Миколаївна ст. викладач

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 30 березня 2020 р. № 924-с

2. Термін подання студентом роботи 04.06.2020

3. Вихідні дані до роботи: алгоритми маршрутизації мобільних сенсорних систем; методика порівняльного аналізу БСМ; якість доставки даних при зміні щільності від визначених критеріїв;

4.Зміст роботи:

1. Аналіз існуючих мобільних сенсорних мереж
2. Виокремлення особливостей маршрутизації в мобільних сенсорних мережах
3. Підвищення ефективності алгоритмів маршрутизації

5. Перелік ілюстративного матеріалу : презентація по темі: Розвиток алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах.

Слайд №1: Назва

Слайд №2: Тема. Мета. Об'єкт, предмет дослідження

Слайд №3: Узагальнена схема мобільної сенсорної мережі

Слайд №4: Математична постановка розв'язуваної задачі

Слайд №5: Використання алгоритмів маршрутизації

Слайд №6: Результати моделювання мереж

Слайд №7: Висновки

Слайд №8: Участь у конференціях

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стан питання і постановка задачі	Лисенко О.І. Професор, д.т.н. проф.	15.01.2020	19.02.2020
Методика та алгоритм порівняльного аналізу БСМ	Лисенко О.І. Професор, д.т.н. проф.	09.03.2020	28.03.2020
Програмування вибору алгоритму маршрутизації за допомогою імітаційного моделювання БСМ	Лисенко О.І. Професор, д.т.н. проф.	29.03.2020	13.04.2020

7. Дата видачі завдання _____ 15.01.2020 _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір матеріалів та відомостей про мобільні сенсорні мережі	15.01.2020 – 19.02.2020	
2.	Вивчення особливостей алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах	20.02.2020 – 09.03.2020	
3.	Аналіз алгоритму маршрутизації методом передачі інформації сусіднім вузлам	10.03.2020 – 28.03.2020	
4.	Підвищення ефективності алгоритму маршрутизації методом передачі інформації сусіднім вузлам	29.03.2020 – 13.04.2020	
5.	Консультування	14.04.2020 – 18.05.2020	
6.	Написання висновків та практичних рекомендацій	18.05.2020 – 01.06.2020	

Студент

_____ (підпис)

Штойко О.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Петрова В.М.

_____ (прізвище та ініціали)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської атестаційної роботи: 63 с., 14 рис., 5 табл. та 15 джерел.

Мета роботи – розвиток алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах.

В даній роботі були визначені основні вимоги до побудови БСМ. Проаналізовані протоколи маршрутизації та було обрано оптимальну структуру мережі та обрано оптимальний метод маршрутизації при побудові безпроводної сенсорної мережі.

Ключові слова: БСМ, вузли, маршрутизація, передача даних.

ABSTRACT

The work includes 63 pages, 14 pictures, 5 tables and 15 information sources.

The purpose of the work is the development of routing algorithms in mobile sensor networks.

This work examines the basic requirements for the construction of BSM were identified. Routing protocols are analyzed and the optimal network structure is chosen and the optimal routing method is chosen when building a wireless sensor network.

Keywords: WSN, nodes, routing, data transmission.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	10
1.1. Аналіз стану існуючих сенсорних мереж.....	10
1.2. Галузі застосування сенсорних телекомунікаційних систем.....	12
1.3. Створення методики порівняльного аналізу БСМ.....	15
Висновки до розділу 1.....	17
2. МЕТОДИКА ТА АЛГОРИТМ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ БСМ.....	18
2.1. Класифікація та типи призначення БСМ.....	18
2.2. Побудова оптимальної типології.....	22
2.3. Алгоритми маршрутизації для мобільних сенсорних мереж.....	25
2.4. Протоколи маршрутизації для мобільних мереж.....	28
2.5. Застосування стратегії забезпечення енергоефективності.....	40
Висновки до розділу 2.....	41
3. ПРОГРАМУВАННЯ ВИБОРУ АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БСМ.....	42
3.1. Вибір програмного забезпечення для імітаційного моделювання мобільних мереж.....	42
3.2. Розробка архітектури моделі мобільної сенсорної мережі в рамках системи імітаційного моделювання.....	45

3.3. Перевірка імітаційної моделі.....	46
3.4. Оцінка якості протоколів маршрутизації для безпроводових сенсорних мереж.....	49
3.4.1. Дослідження впливу щільності мережі на якість обслуговування..	51
3.4.2. Дослідження впливу мережевого навантаження на якість обслуговування.....	53
3.4.3. Дослідження впливу розміру пакетів на якість обслуговування....	56
Висновки до розділу 3.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ABR** (Associativity-Based Routing) – маршрутизація на основі асоціативності
- AODV** (Ad-hoc On-demand Distance Vector) – однорангова дистанційна маршрутизація по вимозі
- API** (Application Programming Interface) - інтерфейс програмування додатків
- DSR** (Dynamic Source Routing) – динамічна маршрутизація джерела
- LMR** (Lightweight Mobile Routing) – легкий мобільний маршрут
- MANET** (Mobile Ad hoc Networks) - бездротова мобільна мережа
- MPR** (Multipoint Relays) – багато точкові ретранслятори
- NGN** (Next Generation Network) – мережі нового покоління
- P2P** (Peer-To-Peer) – однорангова мережа
- SEER** (Simple Energy Efficient Routing Protocol) - простий енергоефективний протокол маршрутизації
- TORA** (Temporally Ordered Routing Algorithms) - тимчасово упорядкований алгоритм маршрутизації
- TTL** (Time To Live) – час життя запиту
- БМЗ** – безпроводові мережі зв'язку
- БСМ** – безпроводова сенсорна мережа
- ПЗ** – програмне забезпечення
- ТКС** – телекомунікаційна система

ВСТУП

Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) стрімко розвиваються протягом останнього десятиліття. Мережі даного типу мають за мету пов'язати реальний світ, що нас оточує, з комп'ютерними мережами в єдину систему. Ідея безпроводових сенсорних є дуже актуальною і досліджується багатьма науковцями і дослідницькими організаціями зі всього світу. Такий ажіотаж до вивчення даних мереж можна пояснити тим, що існує неймовірний перелік можливостей, які надають нам сенсорні мережі. Завдяки спеціальним сенсорам існує можливість передбачати відмову приладів у аерокосмічних системах. Широкого поширення набуває використання безпроводових сенсорних мереж у будівництві для оптимізації і автоматизації різного роду процесів. Завдяки високій автономності і безвідмовності великої популярності набуло використання таких систем у системах безпеки і у військових цілях. Завдяки високій точності дані системи є незамінними у галузі медицини для моніторингу показників людського тіла. Проте, мабуть, найширшого застосування сенсорні мережі досягли в сфері моніторингу навколишнього середовища, адже завдяки їм існує можливість автоматизувати процеси збору даних і отримати величезні обсяги даних, що не можливо було б зробити виключно людськими ресурсами.

Використання БСМ дає можливість створити єдину інформаційну модель на будь-якому об'єкті, який буде контролюватися за допомогою системи вузлів які будуть визначати такі параметри середовища як температура, атмосферний тиск, вологість повітря, вібрації, освітленість, рівень радіації, електромагнітного випромінювання та ін.

Існують жорсткі вимоги до вузлів БСМ. Перш за все це високий рівень енергоефективності, адже зазвичай вони живляться від автономного джерела живлення. Також важливими параметрами є самоорганізація, динамічна автентифікація, гнучкі методи маршрутизації і т.д. Разом із цим потрібно пам'ятати про рентабельність такого вузла і його розміри, та вагу.

Розділ 1 СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз стану існуючих сенсорних мереж

Головним призначенням сучасних телекомунікаційних систем є забезпечення різних інформаційних систем та мереж, наприклад, таких як: Internet, мережі зв'язку, банківські, сенсорні мережі та інших. Головний напрямок розвитку сучасних ТКС як в Україні, так і в світі засновано на створенні мереж наступного покоління (NGN, Next Generation Network). NGN – конвергентні, гібридні широкосмугові мережі, які інтегрують різноманітні мережні архітектури і платформи [1,9]. Користувач мережі повинен обслуговуватися найбільш відповідним та оптимальним на даний момент підключенням, яке задовольняє вимогам до якості обслуговування для поставленого завдання [4,8]. Такі особливості NGN засновані на підтримці декількох мереж доступу. Отже, мережі NGN повинні бути досить гнучкими і забезпечувати всі послуги, які надаються на даний час у фіксованих мережах з різноманітними технологіями без будь-яких обмежень, використовуючи оптимальний метод підключення. Актуальною стає проблема не тільки охоплення мережі, забезпечення якості зв'язку, але й розширення переліку додаткових послуг, що надаються.

Особливе місце серед ТКС різного призначення займають сенсорні мережі, які спрямовані на забезпечення моніторингу як зосереджених, так і розподілених об'єктів [8]. Сенсорні мережі стрімко розвиваються та удосконалюються і є важливою складовою частиною інформаційного суспільства, забезпечуючи моніторинг різних промислових, природних, соціальних та інших процесів. Передбачається стійка тенденція щодо розширення сфери їх застосування, за якістю моніторингу, стійкості, адаптованості. [2, 3, 10]

Сучасна безпроводова сенсорна мережа (БСМ) – це мережа, яка складається з просторово розподілених автономних пристроїв з використанням датчиків (сенсорів), які забезпечують загальний контроль

фізичних, екологічних чи інших параметрів: температури, звуку, вібрації, тиску, руху, дії забруднення та ін. [11].

У сенсорних мережах використовуються як проводові, так і безпроводові технології. Найбільш серйозним недоліком проводових систем є відсутність мобільності, яка є необхідною при виконанні завдань міністерства надзвичайних справ (МНС), правоохоронних органів тощо. Головна відмінність безпроводових мереж зв'язку (БМЗ) від традиційних телефонних і комп'ютерних – відсутність постійної інфраструктури, що належить оператору або провайдеру. Крім того, кожний термінал користувача, що належить БМЗ, повинен мати можливість функціонувати як кінцевий пристрій, так і як транзитний вузол.

Головними вимогами, які висувають до сенсорних мереж, є наступні:

- це має бути безпроводова мережа, яка може складатися з тисяч сенсорів (вузлів системи) з будь-якою зоною покриття, і яка виконує будь-які поставлені перед нею задачі;
- сенсори, що входять до складу мережі, мають самоорганізовуватись в безпроводну мережу, здатну передавати довільну інформацію між двома будь-якими сенсорами цієї мережі з потрібною швидкістю передачі;
- сенсори мають бути непомітними, малогабаритними, високонадійними в експлуатації, захищеними від зовнішніх впливів, енергозберігаючими, щоб мати можливість працювати протягом декількох років;
- сенсори повинні мати низьку вартість.

Існуючі експериментальні БСМ тільки частково задовольняють вищезгаданим вимогам. Більшість існуючих на даний час сенсорних мереж використовують, як правило, передачу інформаційних сигналів по виділених або незалежних каналах, що виділяються [2]. При такій структурі на одному кінці мережі встановлюється датчик, який функціонує за системою 1/0, на другому кінці – пульт сигналізації, на якому відображається наявність сигналу

0 чи 1. Перевагою такої структури є досить висока оперативність, оскільки інформація про зміну параметрів дозволяє швидко реагувати на зміни, які з'являються.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку сенсорні мережі являють собою структури, які складаються з пульта сигналізації, цифрових датчиків, що передають інформацію у вигляді 0 чи 1 по виділеній лінії зв'язку. Такий стан БСМ не може забезпечувати належної мобільності, високої достовірності, надійності передачі інформації і передачу мультимедійної інформації системи. Очевидно, на сьогоднішній день виникла необхідність збільшення обсягу інформації, що передається такої як: передача даних, мови і зображення, тобто слід реалізувати технологію Triple Play.

1.2 Галузі застосування сенсорних телекомунікаційних систем

На рис. 1.1 показана інфокомунікаційна мережа, побудована з використанням елементів сенсорних технологій. Елементи сенсорної мережі є автономними, тобто містять в собі все необхідне для роботи. Вони розробляються таким чином, щоб споживати мінімальну потужність, що забезпечує їм функціонування протягом декількох років від внутрішніх елементів живлення. Сенсор, як і будь-який вузол, включає апаратну частину і програмне забезпечення (ПЗ)[11].

Основними перевагами систем на основі сенсорних мереж є:

- Можливість розміщення в важкодоступних місцях, куди важко і дорого проводити звичайні проводові рішення;
- Оперативність і зручність розгортання і обслуговування системи;
- Надійність мережі – у разі відмови одного елемента мережі, інформація буде передана через інший;
- Високий рівень проникнення через фізичні і стійкість до електромагнітних завад;
- Тривала робота без заміни елементів живлення.

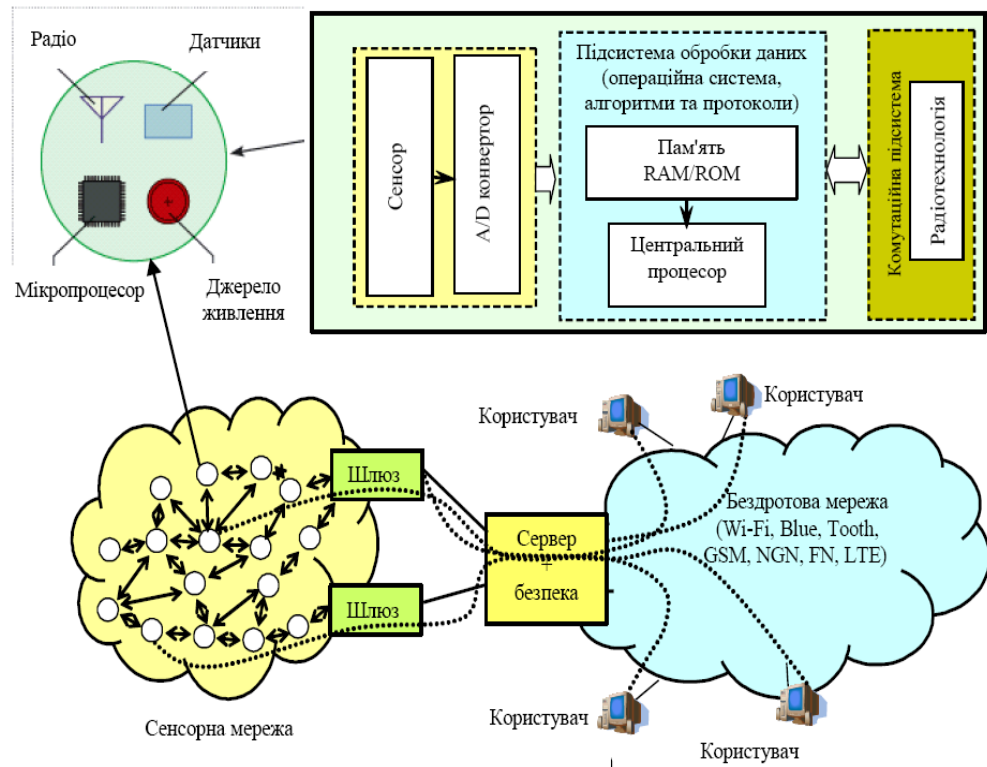


Рисунок 1.1 – Інфокомунікаційна мережа, побудована за допомогою сенсорних технологій

Як показано на рис. 1.1 у загальному випадку сенсор складається із трьох підсистем (моніторингу, сприйняття, обробки даних), а також комунікаційної системи і джерела живлення. Підсистема моніторингу дозволяє сенсору збирати дані про навколишнє середовище: температуру, силу світла, вібрацію, прискорення, магнітне поле, хімічний аналіз повітря, акустику. Саме підсистема моніторингу визначає ту область або додаток, у якому сенсор може бути використаний.

Підсистема обробки даних включає пам'ять і центральний процесор, які дозволяють зберігати й обробляти інформацію генеровану сенсором і службові дані, необхідні для коректного й ефективного функціонування комунікаційної підсистеми. Побудова надійних і ефективних сенсорних мереж – досить складне завдання. Вона являє собою компромісне рішення ряду ключових завдань, безпосередньо пов'язаних з основними принципами їх функціонування. Розробка спеціальної технології передачі даних через

радіоінтерфейс – одне з найважливіших завдань при реалізації сенсорних мереж.

Охорона здоров'я. Медичні сенсорні мережі [1] можуть бути інтегровані з 3G мультимедійними системами для забезпечення дистанційної роботи служби охорони здоров'я. Пацієнти матимуть медичні сенсори, що контролюватимуть певні параметри: температуру тіла, кров'яний тиск, пульс, кардіограма, тощо. Дистанційні медичні центри зможуть виконувати дистанційний моніторинг пацієнтів через відео- і звукові сенсори, сенсори позиціонування, переміщення або активності.

Екологічний моніторинг. Передбачає акустичну і відеопередачу інформації, яка повинна бути передана за короткий проміжок часу. Наприклад, масиви відеосенсорів вже використовуються океанографами, щоб визначити міліну через технології зображення [1].

Моніторинг місцевості. Він включає в себе систему охорони й контролю доступу, контроль маршрутів переміщення людей, виявлення аварій на початкових етапах, протипожежну систему. Прикладом можуть бути БСМ, які призначені для охорони нафтогонів, які являють собою сукупність автономних сенсорних модулів, які монтуються над трубопроводом, що охороняється на глибині 50-80 см.

Управління рухом, системи управління. Такі системи дозволять контролювати автомобільний рух у великих містах або на магістралях і розвернути службу, яка зможе управляти рухом для уникнення утворення заторів. Інтелектуальна система паркування, що складається з мультимедійних сенсорів [7], дозволить відшукати вільні місця, покращуючи мобільність в міських зонах. Мультимедійні сенсори зможуть здійснювати контроль автомобільних потоків і надавати різну інформацію, наприклад про середню швидкість, кількість автомобілів на дорозі і т. п., а також виявляти порушення правил дорожнього руху.

Логістика. Для логістичних автоматизованих комплексів можлива організація збору даних про маршрути переміщення радіопристроїв з

унікальним ідентифікатором між складовими приміщеннями і всередині них з позиціонуванням відносно точок збору даних і зберігання інформації на центральному сервері.

Сільське господарство. Сенсорні мережі можна застосовувати для вирощення різних культур рослин, ведення садівництва та тваринництва. Наприклад, можна розгорнути сенсорну мережу на винограднику і безперервно відстежувати температуру, вологість і інші параметри, важливі для дозрівання кожної лози. Потім можна проаналізувати, яке поєднання погодних умов дає ту або іншу якість продукту (вина).

Будівництво. Створення розподільної системи моніторингу будівель для контролю величин просідань, відхилень від вертикалі і розкриття тріщин або інших деформацій споруд, що знаходяться в зоні будівництва котлованів в реальному часі з виведенням даних на центральних сервер і публікації в WEB.

Надзвичайні ситуації. При пожежі на великому складі в промисловій зоні міста безпроводова сенсорна система, розгорнена в будівлі, зможе передати пожежникам докладну інформацію про місцезнаходження джерела спалаху, характеристики пожежі і причини її виникнення, про можливі шляхи розповсюдження вогню, в деяких випадках допоможе знайти потерпілих та евакуювати їх з місця надзвичайної ситуації.

1.3 Створення методики порівняльного аналізу БСМ

Методика порівняльного аналізу методів маршрутизації є дуже важливою частиною перед побудовою сенсорної мережі, адже лише змодельовав і порівняв основні варіанти вирішення проблем ми можемо вирішити якою буде топологія мережі, алгоритм маршрутизації і т.д.

Запропонована в роботі методика представлена на рис. 1.2.

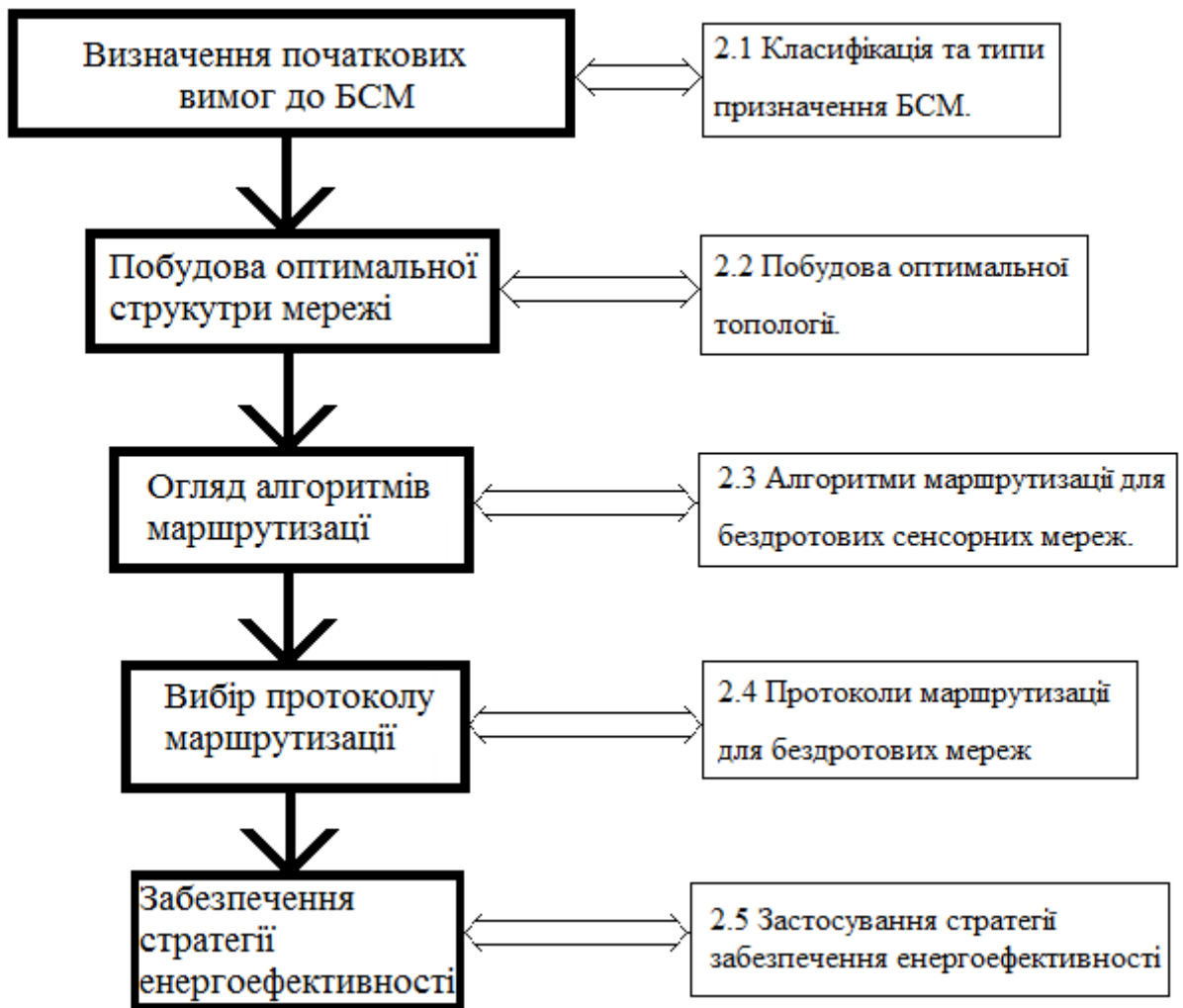


Рисунок 1.2 – Методика порівняльного аналізу БСМ

З рис 1.2 можна зрозуміти, що перш за все, перед створенням БСМ, ми маємо дізнатися з якою метою її створюють. Для початку, знаючи цю інформацію, ми зможемо підібрати потрібні датчики та інше устаткування для вузлів і мережі загалом.

Далі потрібно переходити до вибору топології нашої БСМ. Знаючи параметри середовища (температуру, вологість, освітлення, тощо), рельєф території на якій буде розташована мережа та загальні характеристики навколишнього середовища, ми обираємо топологію, так щоб мережа працювала максимально продуктивно.

Далі ми маємо промодельювати маршрутизацію інформації в нашій мережі та обрати протокол маршрутизацій, який буде нас задовольняти, відповідно до

ситуації. В цьому пункті ми моделюємо БСМ при використанні різних протоколів, щоб мати уявлення про стан інформації та вузлів.

Висновки до розділу

Інтенсивний розвиток сенсорних мереж охоплює усі галузі життєдіяльності суспільства. Проведено класифікацію сенсорних мереж та показано, що вони мають будуватися за технологіями сучасних мереж наступного покоління NGN і повинні забезпечувати передачу різних видів інформації: даних про стан об'єкта або групи об'єктів, що містять інформацію про різні параметри об'єкта моніторингу.

Безпроводові сенсорні мережі широко інтегруються в сучасну телекомунікаційну інфраструктуру та без протоколів взаємодії і методів обчислення різноманітних показників мереж неможливо спроектувати високоефективну та надійну систему. Тому було запропоновано методику порівняльного аналізу безпроводових сенсорних мереж.

Розділ 2 МЕТОДИКА ТА АЛГОРИТМ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ БСМ

2.1 Класифікація та типи призначення БСМ

В даний час бездротові технології широко поширені, існує безліч способів їх класифікації. Так, мережі класифікуються [2]:

- За способом обробки первинної інформації
 - Цифрові
 - Аналогові
- По ширині смуги передачі
 - Вузькополосні
 - Широкополосні
 - Надширокополосні
- За географічної протяжності
 - Персональні
 - Локальні
 - Регіональні (міські)
 - Глобальні.

Залежно від типу призначення, бездротова мережа може мати велику кількість способів побудови топології. Наприклад, мережа може пов'язувати два або більше сегмента провідної мережі. Однак найчастіше бездротова мережа застосовується для зв'язку клієнтських пристроїв з деякою провідною мережею або мережею Інтернет. Наприклад технологія Wi-Fi в інфраструктурному режимі припускає використання спеціалізованого пристрою - точки доступу для приєднання бездротових клієнтів до корпоративної мережі та мережі Інтернет. Кожний бездротовий клієнтський пристрій приєднується до точки доступу, яка працює як бездротової комутатор [7] (рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Інфраструктурний режим Wi-Fi

Особливий тип бездротових мереж - бездротова adhoc мережа [3]. Основна відмінність таких мереж - відсутність централізованого управління. Кожен вузол adhoc мережі може передавати дані для інших вузлів, причому вибір наступного вузла для передачі здійснюється динамічно, на основі поточної зв'язності мережі. Це відрізняє їх від провідних мереж, де тільки маршрутизатори можуть відповідати за доставку даних по мережі. Це також відрізняє їх від класичних бездротових мереж, де спеціальний пристрій - точка доступу, управляє обміном даних між вузлами.

Відсутність централізованого управління робить бездротові adhoc мережі придатними для великої кількості завдань, де використання центрального вузла може бути ускладнене, що покращує масштабованість таких мереж в порівнянні з класичними [15]. Мінімум конфігурації і швидке розгортання таких мереж робить можливим їх використання в умовах стихійних лих або військових конфліктів.

Бездротові adhoc мережі поділяються на:

- MANET (Mobile Ad hoc Networks) - мобільні adhoc мережі. Бездротова самоналагоджувальна мережа, що складається з мобільних пристроїв. Кожен пристрій може вільно рухатись у просторі, відповідно його зв'язки з іншими пристроями можуть часто змінюватися. Кожен пристрій має працювати, як ретранслятор даних, отже, бути маршрутизатором.
- Wireless mesh networks - бездротові комірчасті мережі. Різновид мобільних adhoc мереж. Основна відмінність полягає в тому, що бездротові вузли не переміщуються в просторі під час роботи.
- Сенсорні мережі - бездротові мережі, які з розподілених в просторі автономних пристроїв, що використовують датчики (сенсори) для моніторингу фізичних параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вібрація, тиск, і т.д. Спочатку розвиток сенсорних мереж було мотивоване військовими завданнями, такими як спостереження за територією військових дій. Проте в даний час сенсорні мережі використовуються для індустріальних і цивільних завдань. В даний час бездротові мережі використовуються в сільському господарстві, на виробництві. Такі мережі часто використовуються для попередження та усунення пожеж.

В даний час існує безліч прикладів використання бездротових мереж adhoc. Наприклад, сенсорна мережа, розгорнута у винограднику дозволяє отримувати і аналізувати дані про вологість ґрунту [4]. Це дозволяє оцінити майбутній урожай, а також дає можливість, у разі виникнення критичної ситуації, своєчасно вжити необхідних заходів. Мережа, розгорнута в будівлях промислової зони, допомагає швидко усунути пожежу, в разі її виникнення. Мініатюрні сенсори швидко сповістять про джерело загоряння, отримана інформація дозволить оцінити шляхи

подальшого розповсюдження вогню. А бездротові сенсори, вбудовані в стіни будівлі, постраждалого від землетрусу, зберуть дані про вібрації. Це допоможе оцінити безпеку подальшої експлуатації постраждалого будинку. Вище перераховані типові схеми використання бездротових мереж, однак даними прикладами області їх використання далеко не вичерпуються. Бездротові мережі можуть використовуватися практично в будь-яких областях, де потрібно прийом або передача актуальних даних, а також їх своєчасний аналіз.

Як особливий клас обчислювальних мереж бездротові мережі мають ряд особливостей, що визначають перспективність використання їх у тій чи іншій галузі. Основними умовами, для перспективності розгортання сенсорних мереж, є невисока вартість виготовлення всіх складових елементів мережі, а також їх невеликі розміри. Це, у свою чергу, багато в чому визначає характеристики кожного елемента.

Типові модулі бездротового вузла:

- Пристрій для контролю за спостережуваною системою (датчик). У загальному випадку являє собою вимірювальний пристрій, здатний відстежувати ряд параметрів, наприклад температуру, вологість, рівень радіації, і т.д.

- Модуль живлення. Мобільність пристроїв накладає на цей модуль ряд вимог. Вузол не може отримувати енергію з стаціонарної електромережі. Тим не менш, він повинен бути забезпечений енергією протягом усього часу виконання поставленого завдання. Як джерело енергії може використовуватися акумулятор, сонячна батарея, пристрій, що одержує енергію з радіоефіру.

- Обчислювальний модуль. Являє собою, по суті, мініатюрний обчислювальний пристрій. Обчислювальний модуль може управлятися спеціалізованою операційною системою, наприклад TinyOS мініатюризація та енергооптимізація накладає обмеження на обчислювальні здібності такого пристрою: обсяг пам'яті і частота

процесора обмежені. Обчислювальний модуль, спільно зі спеціалізованим програмним забезпеченням керують поведінкою сенсора, визначають порядок збору та передачі корисної інформації і службових даних.

- Радіопередавач. Бездротова мережа зазвичай складається з безлічі мобільних пристроїв і базової станції, яка збирає, а також можливо зберігає і обробляє отримані дані. Крім цього в структурі такої мережі можлива наявність деяких допоміжних елементів, наприклад додаткові станції для географічного позиціонування пристроїв.

Бездротова мережа може складатися з декількох тисяч елементів, і мати велику протяжність. Слід відзначити кілька особливостей, що відрізняють такі мережі від класичних мереж:

- Велика кількість пристроїв, що використовують одну фізичну середу передачі даних. Внаслідок великої кількості складових елементів в мережі можливі ситуації, коли безліч пристроїв намагаються одночасно використовувати загальний радіоканал для передачі даних.
- Необхідність маршрутизації пакетів із зібраними даними. Внаслідок великої протяжності мережі далеко не всі пристрої мають зв'язок з базовою станцією. Тому для доставки даних деякі пристрої повинні працювати як маршрутизатори, забезпечуючи доставку даних.

2.2 Побудова оптимальної топології

В цьому розділі відповідно до території, ландшафту та інших важливих факторів, що можуть вплинути на зв'язок між вузлами, ми вибираємо або будуємо топологію мережі, яка нас задовольнить.

Топологія мереж характеризує фізичну організацію вузлів різноманітних мереж. Під топологією (компонуванням, конфігурацією, структурою) будь-якої мережі звичайно розуміється фізичне розташування (в даному випадку) вузлів мережі один щодо іншого та спосіб їх з'єднання лініями зв'язку. Топологія бездротової сенсорної мережі відображає структуру зв'язків між її основними функціональними елементами.

Сенсорні вузли можуть закріплюватися стаціонарно, а також мати відносну мобільність, тобто довільно рухатись один відносно одного в деякому просторі, не порушуючи при цьому логічну топологію мережі. В останньому випадку сенсорна мережа не має фіксованої постійної топології, і її структура динамічно змінюється з часом.

Однорангові мережі можуть формувати довільні топологічні структури, обмежені тільки дистанцією між кожною парою вузлів. Прикладом тимчасової або пірингової мережі (від англ. Peer-to-peer, P2P - рівний до рівного) є кластерне дерево. Мережа типу кластерне дерево є окремим випадком мережі P2P, в якій більшість пристроїв є FFD. Пристрої RFD підключаються до кластеру в якості кінцевих вузлів. Для приєднання до мережі віддалених від координатора PAN нових мережевих пристроїв можуть використовуватися вже приєднані до мережі FFD в режимі координатора. У цьому режимі вони, як і спочатку координатор PAN, «зазивають» маяками в мережу нові мережеві пристрої. В результаті формується кластер з мережевих пристроїв, які реагують на свого координатора. Тим не менш, вся інформація про кластер доступна координатору PAN. Подібним чином можуть формуватися мультикластери з мережевих пристроїв [5].

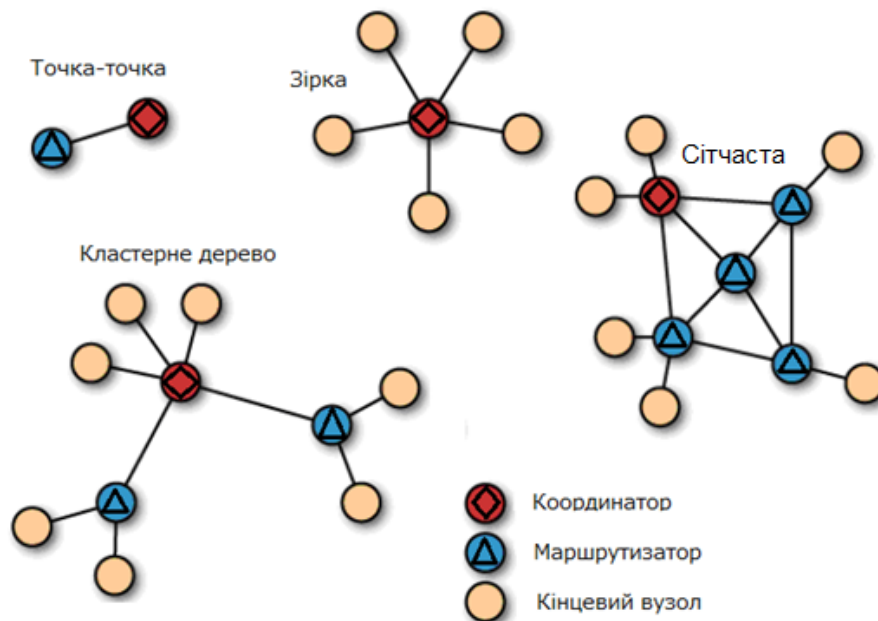


Рисунок 2.2 – Види топологій БСМ

Топологія типу "Зірка" має чітко виділений центр, до якого підключаються всі інші абоненти. Весь обмін інформацією відбувається через центральний вузол, який приймає найбільше навантаження. Конфлікти в такій мережі в принципі неможливі. Головним недоліком даної топології являється той факт, що при відмові центрального вузла буде непрацездатним цілий сегмент мережі.

Сітчаста (mesh) — топологія в якій кожен вузол виконує функцію маршрутизатора в мережі і здатен шукати різні шляхи передачі пакетів. Даний тип дає можливість створення зон суцільного покриття великих площ, масштабування мережі в режимі самоорганізації, використання безпроводових транспортних каналів для організації зв'язку в режимі "кожен з кожним", високу стійкість мережі до втрати окремих вузлів.

Архітектура сенсорної мережі дуже тісно пов'язана з метою, для якої створюється. Беззаперечним плюсом сенсорних мереж є те, що вони дуже гнучкі. Отже, для вирішення будь-якої задачі ми обираємо максимально продуктивні та ефективні положення для всіх елементів сенсорної мережі. Таким чином ми створюємо свою архітектуру мережі, яка задовольняє характеристикам елементів мережі.

2.3 Алгоритми маршрутизації для мобільних сенсорних мереж

Топологія мобільної сенсорної мережі під час її роботи може змінюватися. Залежно від типу мережі та умов її використання це може відбуватися рідко - кілька разів за весь час експлуатації мережі, або часто - кілька разів на секунду. Причиною зміни топології може бути:

- Вихід з ладу одного з пристроїв мережі.
- Включення нового пристрою.
- Переміщення пристрою в просторі.
- Припинення радіозв'язку між двома пристроями (поява перешкоди, джерела перешкод, зміна характеристик середовища передачі).

- Відновлення радіозв'язку між пристроями.

У будь-якому випадку мережа повинна адекватно реагувати на перераховані події, забезпечуючи доставку даних за призначенням. Таке завдання ускладнюється відсутністю централізованого управління. Кожен з пристроїв може виявляти тільки вузли, що знаходяться безпосередньо в зоні його радіопокриття. Тому для вирішення задач маршрутизації для мереж використовується безліч алгоритмів - як загального призначення, так і спеціалізовані.

Можна виділити два основні класи таких алгоритмів: алгоритми формування кластерів та алгоритми вибору оптимального маршруту.

Алгоритми вибору оптимального маршруту

Будь-яка обчислювальна мережа, в тому числі мобільна мережа складається з вузлів і каналів зв'язку між ними. Таким чином, будь-яка мережа може бути представлена у вигляді графа, а завдання пошуку оптимального маршруту - у вигляді задачі пошуку найкоротшого шляху на графі. Більшість завдань цього виду можна розглядати як розширення, узагальнення або модифікацію наступного завдання: У графі G з матрицею ваг $C = [c_{i,j}]$ потрібно знайти шлях між заданою парою вершин s і t , у якого сума ваг складових його ребер мінімальна. Теорія графів включає в себе велику кількість таких алгоритмів, їх модифікацій і розширень. Ці алгоритми відрізняються обмеженнями на досліджуваний граф і часом пошуку.

Алгоритми формування кластерів

Для вирішення завдань маршрутизації деякі протоколи припускають об'єднання пристроїв в групи і призначення їм різних ролей. Типовими ролями є «clusterhead» - лідер кластера, «gateway» - шлюз між кластерами, «ordinary» - звичайний вузол. Для цього використовуються спеціалізовані алгоритми формування кластерів [55]. У класичних мережах існують подібні алгоритми, хоча вирішальні інші завдання. Як приклад можна привести алгоритм вибору локального оглядача мережі (local master browser). Такий алгоритм

використовується протоколом Samba і дозволяє автоматично наділяти комп'ютери локальної мережі різними ролями.

Алгоритм мінімального ідентифікатора (Lowest Cluster Algorithm)

Кожен вузол мережі має унікальний ідентифікатор. Кожен вузол періодично ширококомовно поширює список вузлів, з якими він має прямий зв'язок, включаючи самого себе.

- Вузол, «сусіди» якого мають ідентифікатори більше його власного - лідер кластера (clusterhead).
- Сусідній вузол з найменшим ідентифікатором - лідер для розглянутого вузла, якщо його лідерство не було скасовано іншим вузлом з ще меншим ідентифікатором.
- Вузол, що має двох або більше лідерів в якості сусідів - шлюз між кластерами (gateway).
- У всіх інших випадках розглянутий вузол - звичайний вузол мережі (ordinary).

Алгоритм максимальної зв'язності (Highest Connectivity Cluster Algorithm)

Кожен вузол періодично ширококомовно поширює список вузлів, з якими він має прямий зв'язок, включаючи самого себе.

- Вузол визначається як лідер кластера, якщо він має максимальну кількість безпосередніх сусідів серед всіх вузлів, що щене визначився. У разі рівності застосовується критерій мінімального ідентифікатора.
- Вузол не визначився, якщо він ще не має лідера кластера серед своїх безпосередніх сусідів.
- Вузол, що вже має лідера, тобто належить деякому кластеру, сам уже не може бути лідером.

Алгоритм LCC (Least Clusterhead Change)

Алгоритм LCC є поліпшенням двох попередніх алгоритмів, які ініціюють перевибори в разі будь-якої зміни складу учасників кластера. LCC ініціює перевибори лідера кластера тільки в двох випадках:

- Два лідери кластерів стали безпосередніми сусідами.
- Деякий вузол не має безпосереднього зв'язку ні з одним з лідерів.

Таким чином, якщо деякий вузол потрапляє в уже сформований кластер, він не претендує на лідерство в даному кластері. Алгоритм LCC може використовувати як критерій мінімального ідентифікатора, так і критерій максимальної зв'язності.

Основні особливості вищеописаних алгоритмів:

- Жодні два лідери кластерів не мають безпосереднього зв'язку один з одним.
- У середині кластера два вузли мають можливість зв'язатися один з одним не більше ніж з двома ретрансляції.
- Будь-який вузол є або лідером кластера, або має безпосередній зв'язок принаймні з одним із лідерів.
- Будь-який кластер має одного і тільки одного лідера.

Алгоритм розширюваного кола (Expanding Ring Algorithm)

Алгоритм розширюваного кола починає роботу з «кола» з вузлів, досяжних через одну ретрансляцію. Після розсилки ширококомовних повідомлень із заданим TTL (Time To Live) і отримання відповідей, вузол-ініціатор оцінює кількість вузлів-членів кластеру. У разі якщо розмір кластера менше запланованого - TTL збільшується на 1. У разі, якщо кількість членів більше, ніж заплановано, деякі вузла отримають повідомлення-відмову, і не стануть членами кластеру.

«Швидкий» алгоритм (Rapid Algorithm)

Швидкий алгоритм дозволяє, аналогічно попередньому, сформуванати кластер з фіксованою кількістю вузлів. Нехай B - кількість вузлів майбутнього кластера.

У цьому випадку вузол-ініціатор розподіляє бюджет з $B-1$ учасників між своїми безпосередніми сусідами (нащадками). Сусідні вузли, отримавши певний бюджет, розподіляють його між своїми сусідами. Поширення таких повідомлень завершиться, коли бюджет буде вичерпано, або закінчатся вузли-сусіди, здатні стати членами кластера. Кожен вузол-нащадок, який одержав повідомлення, повинен відправити підтвердження вузлу-батькові. Підтвердження відправляється після отримання підтверджень від усіх власних вузлів-нащадків, або в разі виснаження бюджету. Алгоритм завершиться, коли лідер кластера отримає підтвердження від усіх своїх нащадків. Після цього він зможе оцінити розмір, щільність і діаметр (в термінах кількості ретрансляцій) мережі.

«Наполегливий» алгоритм (Persistent Algorithm)

«Швидкий» алгоритм володіє відносно високою швидкістю роботи і невеликою кількістю службових повідомлень, порядку $2*(B - 1)$. Однак при несприятливому збігу обставин він може сформувати дуже маленький кластер. Наявність великої кількості відносно невеликих кластерів може негативно позначитися на ефективності роботи мережі. «Наполегливий» алгоритм усуває цей недолік. Після отримання підтверджень від усіх нащадків вузол не відправляє відразу підтвердження предку. Отримані підтвердження аналізуються, і у випадку, якщо кількість залучених учасників менше виділеного бюджету, залишок бюджету перерозподіляється між нащадками, повністю вичерпали свій бюджет. Таким чином, описаний алгоритм формує кластер заданого розміру, якщо це можливо.

Три вищеописаних алгоритми дозволяють сформувати кластер з фіксованою кількістю вузлів, проте вимагають, щоб лідер майбутнього кластера був заздалегідь визначений.

2.4 Протоколи маршрутизації для мобільних мереж

Протоколи маршрутизації [12], призначені для роботи в окремому сегменті обчислювальної мережі [14], діляться на два класи:

- Протоколи, що використовують вектор-відстань.
- Протоколи, що використовують стан каналів.

Для забезпечення маршрутизації, заснованої на векторі відстані, кожен елемент зберігає і обмінюється з іншими таблицями векторів, що представляють собою пару значень - відстань (кількість ретрансляцій) і шлях (наступний елемент). Недолік таких протоколів - повільна передача маршрутної інформації, а також тенденція до виникнення циклів. Такі протоколи використовуються зазвичай в невеликих комп'ютерних мережах. Найбільш популярним протоколом, що використовують вектор-відстань, є протокол маршрутизації RIP [12].

Другий клас протоколів, заснованих на алгоритмі переваги найкоротшого шляху, припускає зберігання повної інформації про топологію мережі, яка збирається шляхом періодичної розсилки інформації про стан каналів зв'язку з сусідами. Другий клас протоколів вимагає великих витрат, що є накладними. Найбільш популярним протоколом, що використовують стану каналів, є протокол OSPF [13]. Для бездротових мереж використовуються спеціальні протоколи маршрутизації. В залежності від призначення, розміру, та інших характеристик мережі використовується один з трьох типів протоколів: "плоскі", ієрархічні, а також протоколи, засновані на інформації про географічне положення бездротових мобільних пристроїв. На рис. 2.3 зображена класифікація протоколів для бездротових мереж.

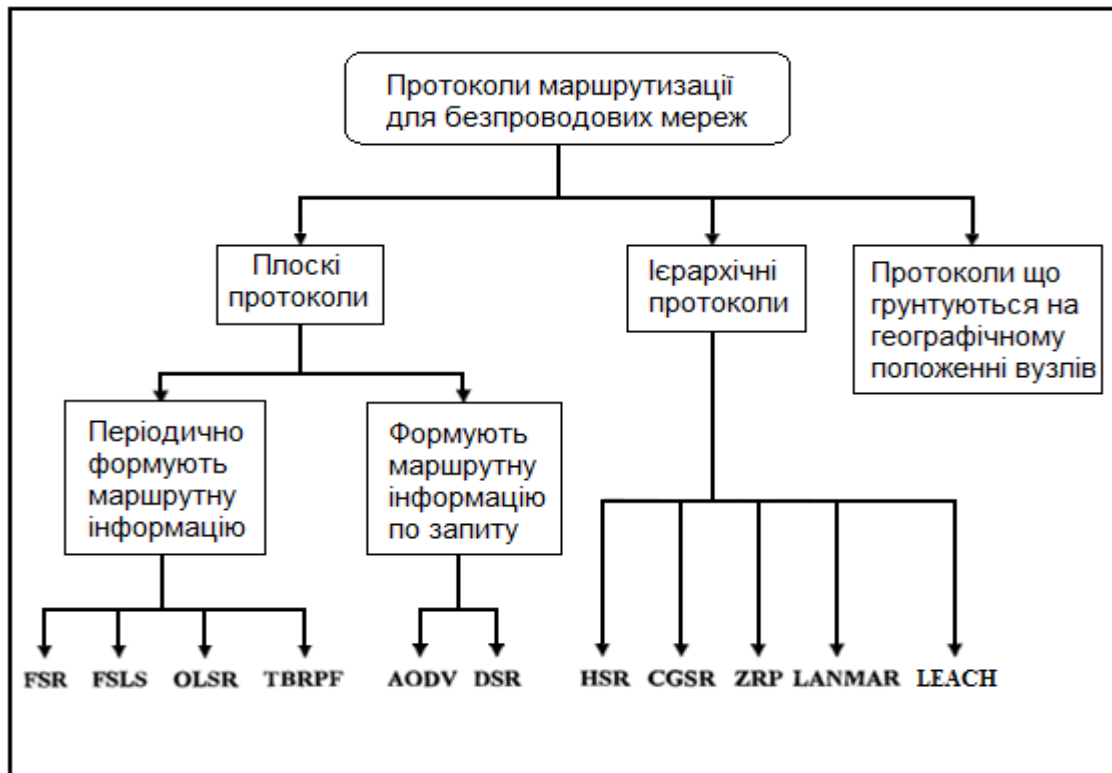


Рисунок 2.3 - Класифікація протоколів маршрутизації для безпроводових мереж

Кожен з протоколів адаптований для деякого класу бездротових мереж. Вибір деякого протоколу маршрутизації безпосередньо впливає на продуктивність мережі, яка може бути визначена різними способами, в залежності від розв'язуваної задачі. Класичні критерії оцінки продуктивності це:

- Пропускна здатність - характеристика, що показує співвідношення кількості одиниць інформації в одиницю часу через систему, канал, вузол. У класичних мережах пропускна здатність оцінюється кількістю даних, які мережа може передати в одиницю часу від одного приєданого до неї пристрою до іншого.
- Затримка передачі пакетів.
- Відхилення затримки передачі від середнього значення.

2.4.1 "Плоскі" протоколи

Такі протоколи не передбачають явного поділу бездротової мережі на логічні сегменти. За стратегії формування маршрутної інформації їх можна розділити на два типи:

Протоколи з випереджувальним формуванням маршрутної інформації.

Протоколи, що формують маршрутну інформацію "на вимогу".

Протоколи з випереджувальним формуванням маршрутної інформації

В основі більшості протоколів такого типу лежать принципи традиційної маршрутизації з інформацією про стан каналів. Ці протоколи припускають періодичний обмін інформацією про стан мережі. Відмінними рисами таких протоколів є швидке знаходження оптимального маршруту, можливість знаходження альтернативного маршруту, що вельми важливо для додатків реального часу.

Протокол FSR (Fisheye State Routing).

Протокол FSR [14] являє собою просте і ефективне рішення, засноване на алгоритмі з станами каналів. Цей протокол передбачає зберігання топології мережі для кожного сенсора, а також поширення такої інформації. Головна відмінність такого рішення від класичного полягає у способі поширення маршрутної інформації. Вузли мережі обмінюються інформацією тільки з сусідами, замість того, щоб розсилати її ширококомовно. Таблиця станів каналів формується на основі інформації, отриманої від сусідів. Обмін інформацією про стан каналів відбувається періодично, а не при зміні топології, що виключає часте оновлення маршрутних таблиць, що відбувається в мережах з ненадійними каналами. Різні записи в таблиці маршрутизації розсилаються з різною частотою, залежно від відстані до відповідного вузла. Інформація про вузли, розташованих на великій відстані оновлюється рідше, ніж про тих, які розташовані ближче. В результаті значна частина записів не включається в пакет з маршрутною інформацією. FSR генерує реальну інформацію про сусідні вузлах, але не про видалені. Однак чим ближче пакет до пункту призначення, тим точніше відомості для пошуку оптимального шляху.

Аналогічний підхід використовується в протоколі FSLs (Fuzzy Sighted Link State). Цей протокол використовує алгоритм HSLs (Hazy Sighted Link State), який ініціює відправку інформації про стан каналів кожні $2^k \cdot T$ періоду часу для певної групи елементів, де k - кількість ретрансляцій, T - мінімальний період між оновленнями маршрутної інформації. Таким чином, FSR і FSLs мають переваги протоколів з випереджувальним формуванням маршрутної інформації, заснованих на стан каналів, забезпечуючи при цьому невеликі накладні витрати при поширенні маршрутної інформації.

Протокол FSR забезпечує можливість формування кількох альтернативних шляхів, що дозволяє в підсумку підвищити пропускну здатність мережі. Цей протокол забезпечує також відносно невелику затримку передачі пакетів, так як кожен вузол зберігає повну інформацію про топологію мережі, що дозволяє вибрати оптимальний маршрут. Однак при тривалій зміні топології мережі протокол FSR показує гірші результати, так як в цьому випадку ймовірність того, що маршрутна інформація виявиться неадекватною значно збільшується.

Протокол OLSR (Optimized Link State Routing Protocol).

OLSR [13], як і всі протоколи подібного типу періодично обмінюється з іншими вузлами інформацією про топологію мережі. Цей протокол використовує технологію MPR (Multipoint Relays) для запобігання зайвих пересилань при ширококомовній розсилці.

Вузол, скажімо A , що використовує OLSR як протокол маршрутизації, формує список своїх безпосередніх "сусідів". Далі, у кожного з сусідніх вузлів запитується інформація про його безпосередніх "сусідах". Після цього вузол A формує список вузлів, що знаходяться від нього на відстані двох ретрансляцій, і формує серед безпосередніх "сусідів" мінімальний набір ретрансляторів (список MPR). Для формування списку MPR використовуються евристичні алгоритми. Кожен вузол розсилає своїм безпосереднім "сусідам" свій список MPR. Таким чином вузол A , отримуючи від своїх сусідів їх списки MPR, формує список селекторів MPR - список вузлів, що вибрали A в якості MPR. Відмінності протоколу OLSR від класичних протоколів, що використовують

інформацію про стани каналів, обумовлюються двома особливостями. По-перше, тільки MPR вузли повинні ретранслювати маршрутну інформацію. По-друге, зменшується розмір пакета з інформацією про стан каналів, так як включається тільки інформація, отримана від MPR селекторів. Протокол передбачає поширення часткової інформації про топологію мережі, тобто вузол А може бути досягнутий тільки через MPR селектори. OLSR знаходить найкоротший шлях, використовуючи інформацію про своїх сусідів і MPR всіх інших вузлів. OLSR призначений для мереж з великою щільністю. У разі сильно «розрідженій» мережі кожен сусідній вузол буде MPR. У цьому випадку OLSR перетворюється на «чистий» протокол, що використовує інформацію про стани каналів.

У зв'язку з використанням тільки MPR для поширення маршрутної інформації OLSR забезпечує порівняно погану продуктивність, так як деякі канали можуть не використовуватися. Цей протокол може формувати неоптимальний маршрут, що неминуче збільшить затримку при доставці пакетів. А через неможливість використання деяких каналів падає пропускна здатність мережі. Однак слід зазначити, що протокол забезпечує відносно стабільну роботу при частій зміні топології, швидко реагуючи на такі зміни з невеликими накладними витратами.

Протокол TBRPF (Topology Broadcast Based on reverse Path Forwarding).

TBRPF [14] - це також протокол, що використовує інформацію про стан каналів. Принципова відмінність від «чистого» протоколу такого типу полягає у способі розсилки інформації про стан каналів.

TBRPF працює таким чином: Нехай вузол S - джерело повідомлень про оновлення. Кожен вузол і в мережі вибирає свій наступний ретранслятор для передачі у напрямку до вузла S. Цей ретранслятор буде предком для і по відношенню до S. Для вибору предка знаходиться шлях з мінімальною кількістю стрибків. Таким чином для вузла S буде сформовано сполучне дерево. Замість ширококомовної розсилки, TBRPF відправляє інформацію про зміни стану каналів тільки вузлам сформованого дерева, так вузол і отримує

інформацію від вузла-предка, і передасть її вузлу-нащадку. Листя дерева ці повідомлення не ретранслюють. При зміні топології мережі відповідні сполучні дерева негайно змінюються. Таким чином TBRPF швидше пристосовується до змін топології, виробляє менше накладних витрат, ніж «чистий» протокол зі станом каналів.

Крім TBRPF існує безліч інших протоколів, що використовують альтернативні способи ширококомовної доставки маршрутної інформації. Серед них можна виділити розробки P. Humblet і S. Soloway, а також надійну версію протоколу ERPF (Extended Reverse- Path Forwarding). Однак ці рішення, на відміну від TBRPF, призначені для роботи в мережах з незмінною топологією, і не можуть застосовуватися для бездротових мереж.

Протокол TBRPF забезпечує високу продуктивність мережі. Пакети мають невелику затримку, мережа володіє відносно високою пропускнуою здатністю. Однак у великій мережі з частою зміною топології цей протокол формує відносно багато службового трафіку, що може позначатися на продуктивності.

Протоколи, що формують маршрутну інформацію "на вимогу"

Це досить поширена категорія протоколів маршрутизації для бездротових мереж. Для зменшення накладних витрат пошук маршруту проводиться тільки при необхідності відправки пакета. Як приклад таких протоколів можна привести AODV (AdHoc On Demand Distance Vector Routing), ABR (Associativity-Based Routing), DSR (Dynamic Source Routing), LMR (Lightweight Mobile Routing), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithms), SEER (Simple energy efficient routing protocol). Серед всіх протоколів можна особливо виділити AODV, DSR і SEER які всебічно проаналізовані та є кандидатами для стандартизації.

При появі даних, які потребують передачі, такий тип протоколів передбачає перехід пристрою в фазу «виявлення маршрутів». На цьому етапі пакети із запитом ширококомовно поширюються по мережі для знаходження шляху. Цей етап завершується тоді, коли знайдений маршрут або всі можливі шляхи від джерела. Існує декілька підходів для виявлення шляхів в цьому алгоритмі.

Протокол DSR (Dynamic Source Routing)

Протокол DSR [14] знаходить шляхи, використовуючи інформацію з заголовка пакета-запиту. У пакет-запит записуються ідентифікатори вузлів, через які пройшов цей пакет. Отримавши пакет-запит, вузол-приймач відправляє назад пакет з відповіддю. Для цього використовується шлях, взятий з пакету-запиту. Пакети з даними також несуть у своїх заголовках шлях до джерела. У DSR вузли активно використовують кешування маршрутів для мінімізації накладних витрат при виявленні шляху. Ця схема дозволяє зберігати кілька шляхів до вузла призначення. У разі обриву деякого з'єднання вузол може відкласти процедуру пошуку нового шляху, і замість цього використовувати альтернативні. Пошук нового шляху почнеться відразу ж в тому випадку, якщо альтернативний шлях недоступний. Включення в пакети шляхів дозволяє легко виявляти циклічні маршрути.

Протокол DSR, так само як AODV забезпечує відносно велику затримку доставки пакетів. Однак, завдяки можливості формування альтернативних шляхів, DSR забезпечує більш високу пропускну здатність. Тим не менш, хороша продуктивність забезпечується тільки для мережі з неінтенсивним трафіком.

SEER (Simple energy efficient routing protocol). Протокол для однорангових мереж. Мета роботи протоколу – підвищити тривалість життя мережі, шляхом скорочення числа передаваних між вузлами повідомлень. Не має за ціль управління і балансування енергії. Вибір маршруту базується як на відстані до базової станції, так і на залишку заряду батареї вузлів, які розташовані на шляху прокладеного маршруту. Зниження комунікації між вузлами за рахунок SEER, скорочує загальне споживання енергії. Результат симуляції показав, що SEER виконує оптимізацію за часом життя тільки в специфічних умовах.

Умови функціонування протоколу:

- ініціатором протоколу є джерело, тобто базова станція самостійно вибирає які дані їй потрібні, і від яких вузлів хоче їх отримати;

- до вузлів передають дані, тільки якщо отримують нову інформацію від сенсорів;
- дані передаються по одному маршруту, який динамічно визначається;
- вузол може передавати повідомлення тільки одному зі своїх сусідів;
- алгоритм вибору маршруту повинен бути максимально простим в обчисленні;

Результати роботи протоколу показують, що протокол має хорошу масштабованість, і, дійсно, зменшує енергоспоживання мережі за рахунок скорочення передаються повідомлень. Проблемою даного протоколу є те, що навантаження на вузли розподіляється нерівномірно, тобто вузлам, які знаходяться біля sinknode доводиться обробляти більше інформації, і вони частіше виходять з ладу.

2.4.2 Ієрархічні протоколи

Описані вище «плоскі» протоколи використовують різні методи для зменшення накладних витрат, пов'язаних з маршрутизацією, забезпечуючи при цьому необхідний рівень ефективності. Однак при збільшенні кількості пристроїв у мережі збільшуються і накладні витрати. При цьому рано чи пізно настає момент, коли інтенсивний службовий трафік, а також необхідність обробки і зберігання великої кількості маршрутної інформації унеможливають нормальну роботу мобільної мережі. У таких випадках використовуються ієрархічні протоколи маршрутизації. У класичних мережах, наприклад в мережі Інтернет, такий тип маршрутизації використовується досить давно. Основний принцип роботи ієрархічних протоколів полягає в поділі вузлів мережі на групи, а також у різному поведінці вузлів для подій всередині своєї групи і поза групою. Важливою перевагою такого типу протоколів є зменшення розміру таблиць маршрутизації і службових

повідомлень, так як в цьому випадку вони включають в себе інформацію не про всю мережу, а тільки про певну її частину.

Найчастіше вузли об'єднуються в певний кластер, згідно з їх географічного положення. При цьому кожен кластер зазвичай має один ведучий або головний вузол. Тим не менш, існує інший підхід до організації мережі, коли використовується неявна ієрархія. У цьому випадку кожен вузол має свою зону видимості, і при цьому поводить себе по різному по відношенню до вузлів усередині і поза даної області.

Протокол HSR (Hierarchical State Routing)

Ієрархічний протокол HSR [15] заснований на інформації про стан каналів. У процесі роботи він формує вкладену ієрархію, де лідери кластерів на більш низькому рівні стають членами наступного, більш високого рівня. Ці вузли потім також об'єднуються в кластери, і т.д. Така організація мережі дозволяє зменшити накладні витрати, пов'язані зі зберіганням, обробкою і передачею маршрутних таблиць.

Кожен вузол повинен мати унікальний ідентифікатор (MAC адреса). Протокол HSR присвоює кожному вузлу ще одна адреса - НІД (Hierarchical ID), який являє собою послідовність MAC адрес вузлів на шляху від вузла самої верхньої ієрархії до нього самого. Для доставки пакет направляється на більш високий рівень ієрархії, поки доставка до вузла призначення не стане можливою.

Даний протокол забезпечує відносно погану продуктивність, його застосування виправдане тільки для дуже великих мереж без особливих вимог до продуктивності.

Протокол ZRP (Zone Routing Protocol)

Протокол ZRP [15] використовує одночасно стратегії випереджального формування маршрутної інформації та формування такої інформації за запитом. Кожен вузол має навколо себе деяку зону з вузлів, доступних менш ніж через N ретрансляцій. Для вузлів усередині зони використовується протокол з випереджувальним формуванням маршрутної інформації. У разі

необхідності доставити інформацію до вузла поза зоною, використовується протокол, який формує маршрутну інформацію на вимогу. Для цього використовуються пакети запитів/відповідей. У середині зони шляху до будь-якого вузла відомі, тому запити поширюються від межі зони до наступного кордону. Така схема дозволяє значно знизити накладні витрати на зберігання і доставку маршрутної інформації, оскільки кожен вузол поширює маршрутну інформацію тільки всередині своєї зони, а запити з вимогою маршруту поза зоною поширюються тільки вузлами, що знаходяться на межах зон.

Комбіноване використання двох підходів для формування маршрутної інформації дозволяє протоколу ZRP забезпечувати відносно високу пропускну здатність навіть для великих мереж з досить інтенсивним трафіком. Однак затримка для пакетів в мережі з ZRP буде відносно велика.

Протокол LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).

Протокол з контролем топології і кластеризацією. Підходить для мереж з ієрархічною структурою. Протокол є таким, що саморганізовується і адаптується під різні стани мережі для розподілу енергії по мережі. Вузли являються однорідними і мають обмежений запас енергії. У мережі є базова станція і всі вузли знають про її фізичне місцезнаходження. Вузли динамічно об'єднуються в кластери, всередині яких відбувається вибір головного вузла (clusterhead), для запобігання надмірного споживання енергії. Протокол включає в себе агрегування даних і скорочення розсіювання енергії в 8 разів.

Всі операції розбиваються на раунди. На початковій фазі для передачі кожного разу заново вибирається головний вузол в кластері (головний вузол), для чого відбувається оголошення вибору головного вузла в кластері. Рішення про вибір приймається незалежно усіма вузлами в один і той же час. Рішення про вибір головного вузла приймається на основі:

1. Передбачуваний відсоток головних вузлів приймається апріорним.
2. Кількості разів, коли вузол був головним тривалий час.
3. Кількість енергії вузла в поточний момент.

Ухвалення рішення проводиться вузлом n , який довільно обирає символ між 0 або 1, відбувається розрахунок формули .

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod n)}, n \in G & (1) \\ 0, \notin G \end{cases}$$

де:

r – поточний раунд;

P – ймовірність вибору головним вузлом;

n – вказівник на поточний вузол.

Якщо згенерований символ менше $T(n)$, то вузол стає головним вузлом.

Вузли, які були clusterhead в нульовому раунді, не можуть бути ними знову протягом раундів $1/P$. Після $1/P - 1$, $T = 1$. Після цього всі вузли можуть ставати головним вузлом. У фазі steady-state дані передаються базової станції. У порівнянні з фазою setup, steady-state більш тривала для того, щоб мінімізувати витрату енергії.

У протоколі використовується CSMA (Carrier Sense Multiple Access) - протокол MAC-рівня, в якому кожен вузол перевіряє відсутність передачі іншими вузлами, до початку передачі на транспортному рівні.

Критичним параметром мережі є відсоток вузлів, які є головними вузлами (в іноземній літературі вживається термін clusterhead). У разі середнього і великого відсотка, і якщо відстань до головного вузла довше, ніж між вузлами і стоком, то витрачається більше енергії. Оптимальним вважається 5% головних вузлів від кількості всіх вузлів мережі. В такому випадку протокол допомагає досягти зменшення загальної енергії мережі в 7-8 разів в разі односпрямованої передачею, в 4-8 разів, при передачі пакетів по декільком вузлам відразу.

Якщо потрібно, то всі вузли гинуть, в один час завдяки справедливому розподілу ролей головних вузлів.

Мінімізується загальна витрата енергії мережі за допомогою поділу навантаження між усіма вузлами в різні моменти часу. Необхідний вибір

найбільш енергійного вузла, так званого cluster-head. Вузли не зобов'язані знати про топології всієї глобальної мережі. Підходить для мало віддалених один від одного вузлів.

Протокол поширений в сенсорних мережах, але, на жаль, прагне тільки зберегти енергію, але не розподілити її між узлами. У літературі утворилося два типи енергозберігаючих протоколів для сенсорних мереж: так звані energy save protocols і energy manager (balancing) protocols.

2.5 Застосування стратегії забезпечення енергоефективності.

Завдання забезпечення енергоефективності зводиться до підвищення загального часу роботи всієї мережі в цілому. Вирішити таке завдання можливо, правильно розмістивши транзитні вузли, що дозволить рівномірно розподілити навантаження по всій мережі і тим самим забезпечити мінімальну дисперсію показників середнього енергоспоживання пристроїв. Другий спосіб досягнення ефективного енергоспоживання - налаштування оптимального режиму доступу до середовища. Кожен з функціональних і транзитних вузлів може перебувати в одному з чотирьох режимів: передача, прийом, обчислення і сон [6]. Мінімізація тимчасових інтервалів, що використовуються режимами з максимальним споживанням енергії, дозволить збільшити загальний час функціонування вузла. Функцію забезпечення енергоефективності можна записати наступним чином:

$$(\mathbf{R}'', T'') = f(\mathbf{R}', T', L)$$

де \mathbf{R}'' - вектор зв'язків між вузлами, доповнений новими маршрутами, T'' - множина транзитних вузлів з урахуванням змінених і доданих на цьому етапі, $f(x)$ - функція перерозподілу транзитних вузлів з метою забезпечення енергоефективності

$$y_e = g(\mathbf{R}'', T'', \mathbf{Q})$$

$y_e \in \{0,1\}$ - результат перевірки енергоефективності мережі, $g(x)$ - функція перевірки на енергоефективність.

Висновки до розділу

Звісно, найбільш ефективною технологією обміну інформацією у БСМ є мобільна технологія передачі. Завдяки цьому збільшується масштабованість, надійність мережі. Проте використання безпроводових технологій накладає певні обмеження.

Проведено аналіз топологій, алгоритмів маршрутизації та протоколів маршрутизації, які використовуються в різного типах мереж для вирішення завдань БСМ.

Передача інформації в сенсорній мережі здійснюється шляхом її перенаправлення до найближчого вузла, а не на базову станцію або точку доступу як у традиційних системах з фіксованою інфраструктурою. Подібні системи називаються багатокроковими. На сьогоднішній день розроблено досить багато протоколів маршрутизації, що враховують специфіку роботи сенсорних мереж. Для різних прикладних завдань необхідне використання різних підходів до маршрутизації.

Розділ 3 ПРОГРАМУВАННЯ ВИБОРУ АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БСМ

3.1 Вибір програмного забезпечення для імітаційного моделювання мобільних мереж

Останнім часом спостерігається явна стійка тенденція в широкому залученні методів комп'ютерного імітаційного моделювання в процес проектуванні телекомунікаційних мереж. Необхідність моделювання процесів в сучасних комп'ютерних мережах обумовлена не тільки збільшенням їх складності та "інтелектуальності". Розробка комп'ютерних мереж стає відносно буденним процесом, що потребується масовим замовником. Це замовлення добре підтримується розвитком програм-симуляторів. У США, Європі, Японії та Австралії над розробкою методів і компонент імітаційного моделювання працюють найбільші наукові центри та виробники телекомунікаційного обладнання. У більшості технічних університетів світу читаються курси, пов'язані з імітаційним моделюванням мереж зв'язку. Добре відома класифікація методів моделювання на два класи: фізичні (натурні) і математичні. У свою чергу, математичні моделі діляться на аналітичні і імітаційні. Аналітичні моделі передбачають використання аналітичних методів розрахунку за допомогою теорії масового обслуговування (відома формула Ерланга та ін.). Але саме імітаційні моделі дозволяють досліджувати характеристики потоків трафіку у великих сенсорних мережах, показники якості обслуговування і ефективність роботи мережевих протоколів. Існує три основних види імітаційних моделей:

- Агентне моделювання - відносно новий напрямок в імітаційному моделюванні, яке використовується для дослідження децентралізованих систем, динаміка функціонування яких визначається не глобальними правилами і законами (як в інших парадигмах моделювання), а навпаки. Коли ці глобальні правила і закони є

результатом індивідуальної активності членів групи. Мета агентних моделей - отримати уявлення про цих глобальних правилах, загальному поведінці системи, виходячи з припущень про індивідуальний, приватному поведінці її окремих активних об'єктів і взаємодії цих об'єктів в системі. Агент - якась сутність, що володіє активністю, автономним поведінкою, може приймати рішення відповідно до деяким набором правил, взаємодіяти з оточенням, а також самостійно змінюватися.

- Дискретно-подійне моделювання - підхід до моделювання пропонує абстрагуватися від безперервної природи подій і розглядати тільки основні події модельованої системи такі як: «очікування», «обробка замовлення», «рух з вантажем», «розвантаження» та інші. Дискретно-подійне моделювання найбільш розвинене і має величезну сферу додатків - від логістики та систем масового обслуговування до транспортних і виробничих систем. Цей вид моделювання найбільш підходить для моделювання виробничих процесів.
- Системна динаміка - парадигма моделювання, де для досліджуваної системи будуються графічні діаграми причинних зв'язків і глобальних впливів одних параметрів на інші в часі, а потім створена на основі цих діаграм модель імітується на комп'ютері. По суті, такий вид моделювання більш всіх інших парадигм допомагає зрозуміти суть того, що відбувається виявлення причинно-наслідкових зв'язків між об'єктами і явищами. За допомогою системної динаміки будують моделі бізнес-процесів, розвитку міста, моделі виробництва, динаміки популяції, екології та розвитку епідемії.

Мобільні сенсорні мережі складаються з великої кількості автономних пристроїв, централізоване управління такою мережею зазвичай відсутнє. Тому для таких мереж необхідно використовувати агентні імітаційні моделі.

Найбільш потужними по спектру можливостей (топология, продуктивність, економічний розрахунок, забезпечення якості обслуговування та ін.), Безумовно, є комерційні мережеві симулятори. Серед найбільш відомих програмних пакетів можна відзначити BONES (розробка компанії CADENS), COMNET (CACI), OPNET (MIL3), NETMAKER (OPNET). Однак вартість будь-якого такого пакета становить кілька десятків тисяч доларів. Нині мало замовники готові вкладати кошти подібного рівня тільки в один з етапів проектування своєї мережі. Тому для нас інтерес представляють пакети мережевого імітаційного моделювання, що відносяться до класу так званих "opensource" програм, тобто програм у відкритих кодах і вільно розповсюджуються у «всесвітній павутині». Найважливішою властивістю таких симуляторів є можливість розширення їх функціональних можливостей (включення нових протоколів, методів управління трафіком та ін.) користувачами цих пакетів.

У роботі для імітаційного моделювання використовувалася система DaSSF. DaSSF (Dartmouth SSF) - це реалізована на C ++ система SSF (Scalable Simulation Framework). SSF - уніфікований, об'єктно орієнтований API (Application Programming Interface) для дискретно подієвої симуляції великих систем. Реалізація DaSSF заснована на високопродуктивному ядрі, що володіє великим запасом продуктивності паралельних обчислень.

Основні переваги системи DaSSF при моделюванні бездротових сенсорних мереж полягають у наступному:

- Висока швидкість роботи, можливість моделювання великих мереж.
- Можливість розпаралелювання обчислень. Можливий розрахунок моделі як на багатоядерних і багатопроцесорних ЕОМ, так і на кластерах.

3.2 Розробка архітектури моделі мобільної сенсорної мережі в рамках системи імітаційного моделювання

Модель бездротової сенсорної мережі реалізована за допомогою системи імітаційного моделювання DaSSF. SSF API надає п'ять базових класів: Entity, Process, Event, inChannel, outChannel.

- Entity - базовий клас, що представляє логічний процес під час імітації. Цей клас працює як контейнер, що містить змінні, що використовуються під час імітації. Наприклад, такі об'єкти як вузол мережі або маршрутизатор буде представлено в моделі як нащадки класу Entity. Класи Process, biChannel і OutChannel, а також їхні нащадки завжди ставляться до нащадка класу Entity.
- Process - частина деякої сутності (екземпляр класу Entity), що визначає зміну станів логічних компонентів системи імітаційного моделювання. Процес може припинити свою роботу, чекаючи деякої події на каналі, або на певний період часу.
- inChannel - представляє кінцеву точку зв'язки між сутностями. Один екземпляр класу inChannel може бути пов'язаний з декількома екземплярами класів outChannel, які є початковими точками зв'язку між сутностями. Коли деяке повідомлення відправляється на outChannel, воно з'являється inChannel. Процеси (екземпляри класів Process) можуть очікувати повідомлення, що приходять на inChannel. Клас inChannel містить методи для відновлення повідомлень, відправлених по каналу зв'язку.
- outChannel - початкова точка каналу зв'язку між сутностями. Один екземпляр класу outChannel може бути пов'язаний з декількома екземплярами класів inChannel.
- Event - базовий клас повідомлень, ., пересилаються між сутностями за допомогою каналів зв'язку.

У процесі імітаційного моделювання мобільної сенсорної мережі можна виділити наступні основні етапи:

- Ініціалізація. На цьому етапі визначається топологія мережі: створюються канали між вузлами, визначаються логічні зв'язки між вузлами і джерелами даних. На цьому етапі також визначається час імітаційного моделювання.
- Імітація. На цьому етапі моделюються значущі події, мережевий трафік, поведінка окремих вузлів.
- Оцінка. На цьому етапі аналізується робота мережі, проводиться оцінка її ефективності на основі критеріїв оцінки.

3.3 Перевірка імітаційної моделі

Для реалізованої імітаційної моделі необхідна перевірка на відповідність її поведінки задумам дослідження і моделювання. Така перевірка включала в себе дві категорії оцінки - верифікація моделі та валідація даних. Процедури верифікації проводять, щоб переконатися, що модель поводить себе так, як було задумано. Верифікація імітаційної моделі припускає доказ можливості використання створеної програмної моделі в якості машинного аналога концептуальної моделі на основі забезпечення максимальної схожості з останньою.

Реалізована імітаційна модель призначена для імітації роботи мобільної сенсорної мережі. Значущими складовими моделі, визначальними концептуальні особливості поведінки досліджуваних мереж є реалізація канального рівня передачі даних, а також досліджуваних протоколів маршрутизації. У процесі верифікації канального рівня перевірялося відсутність колізій при передачі для пристроїв, що знаходяться на відстані дії радіопередавача. Також перевірявся той факт, що кожний пристрій здатний передавати потік даних через середу передачі. При цьому навантаження на канали варіювалося від 10% до 90%. Таким чином була перевірена коректність роботи механізму RTS / CTS, що представляє в даному випадку технологію

доступу до середовища, а також коректність механізму відстрочення передачі пакета.

Для верифікації протоколів маршрутизації була проведена їх покрокове трасування. Для протоколів FSR і DSFSR було досліджено час поширення маршрутної інформації. Так для протоколу FSR час оновлення маршрутної інформації в ідеальних умовах може бути аналітично обчислено як

$$t = \begin{cases} n \cdot t_r \cdot \text{int}_1, n < n_1 \\ n_1 \cdot t_r \cdot \text{int}_1 + (n - n_1) \cdot t_r \cdot \text{int}_2, n_1 < n < n_2 \\ n_1 \cdot t_r \cdot \text{int}_1 + (n_2 - n_1) \cdot t_r \cdot \text{int}_2 + (n - n_1 - n_2) \cdot t_r \cdot \text{int}_3, n_2 < n < n_3 \\ \dots \end{cases}$$

В цій формулі

n_i - кількість хопів зони

int_i - інтервал оновлення зони

t_r - мінімальний інтервал оновлення

Для протоколу DSFSR цей час може бути обчислено як $t = n \cdot t_r \cdot \text{int}_1$.

Покрокове трасування протоколів маршрутизації показало принципову відповідність їх роботи з теоретичними припущеннями, а також правильність обробки вхідних даних.

Таким чином, в ході випробування елементів внутрішньої структури імітаційної моделі була досліджена внутрішня спроможність моделі.

Валідація даних спрямована на доказ того, що всі використовувані в моделі дані володіють задовільною точністю і не суперечать досліджуваній системі, а значення параметрів точно визначені і коректно використовуються. У процесі валідації даних були досліджені параметри розподілу значень вихідних даних. Для розробленої імітаційної моделі була зроблена оцінка стійкості і точності вихідних даних.

Для оцінки стійкості даних було досліджено зміну дисперсії вихідних даних при збільшенні часу моделювання. Було проведено дослідження мережі, що складається з 100 вузлів. Для маршрутизації використовувався протокол FSR. Дисперсія досліджувалася на вибіркою обсягом 100. В якості

оцінюваного параметра було обрано значення критерію максимального середнього часу доставки. Таким чином, були отримані такі дані (таблиця 3.1):

Час моделювання	Дисперсія для критерія максимального середнього часу доставки
1 минута	0,310
2 минuty	0,270
3 минuty	0,120
5 минут	0,092
8 минут	0,087
10 минут	0,081

Таблиця 3.1 - Дисперсія для критерія оцінки якості

При збільшенні часу моделювання дисперсія не збільшується, таким чином, був зроблений висновок про стійкість отриманих даних.

Для оцінки точності в імітаційну модель був включений клас Validation. Оцінка точності здійснюється в два етапи. Перший етап включає в себе перевірку нормальності розподілу отриманих даних за допомогою критерію Колмогорова. Згідно з цим критерієм міра відхилення емпіричної функції розподілу $F_n^*(x)$ від гіпотетичної функції розподілу $F(x)$ визначається таким чином:

$$D_n = D\{F_n^*, F\} = \sup_x |F_n^*(x) - F(x)|$$

Гіпотеза про відповідність функції розподілу з гіпотетичною приймається на рівні значущості α , якщо $\sqrt{n}D_n \leq k_\alpha$, де k_α - квантиль розподілу Колмогорова.

На другому етапі обчислюється інтервал довіри для отриманих даних. Для цього використовується вибіркова дисперсія для вибірки (X_1, X_2, \dots, X_n) :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Тоді значення математичного очікування отриманого значення лежить в інтервалі з кінцями в точках $\bar{X} - t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1} \frac{S}{\sqrt{n-1}}$ і $\bar{X} + t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1} \frac{S}{\sqrt{n-1}}$.

Тут $t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1}$ - проценти розподілу Стюдента, можуть бути отримані з їх таблиць. Оцінка точності проводиться безпосередньо в процесі імітаційного моделювання.

3.4 Оцінка якості протоколів маршрутизації для безпроводових сенсорних мереж

Для оцінки якості протоколів маршрутизації для роботи в рамках розробленої імітаційної моделі були взяті такі протоколи:

- Протокол FSR
- Протокол DSFSR

Для моделювання джерел корисних даних використовувалася модель джерела даних з безперервним контролем.

Для дослідження протоколів використовувалася імітаційна модель мережі з наступними основними параметрами та налаштуваннями (таблиця 3.2):

	Назва параметра	Позначення	Значення параметра	Одиниці виміру
Характеристики радіопередавача та середовища	Бітова швидкість передачі	BPS	1024	Кбит/с
	Рівень бітових помилок	BER	10^{-3}	1/бит
	Затримка ініціалізації передачі	Slottime	50	мкс
	Середній час періода стабільності каналу		300	с
	Середній час періода відсутності каналу		30	с
Характеристики каналового рівня	Короткий міжкадровий проміжок	SIFS	100	мкс

	Розподілений міжкадровий проміжок	DIFS	1000	мкс
	Мінімальне вікно конкурентного доступу	CW_{\min}	16	
	Максимальне вікно конкурентного доступу	CW_{\max}	1024	
Параметри джерел корисних даних	Середнє значення періода появи нових даних	T_m	15	с
	Час реакції на зміну параметра	Δ_t	1	мс
Початкова топологія	Кількість пристроїв		100	
	Розмір полігону	X	100	м
	Радіус дії передатчика	Y	100	м
Параметри протокола маршрутизації	Кількість зон		3	
	Кількість хопів першої зони		2	
	Кількість хопів другої зони		5	
	Кількість хопів третьої зони		∞	
	Період розповсюдження маршрутних даних для першої зони		5	с
	Період розповсюдження маршрутних даних для другої зони		15	с
	Період розповсюдження маршрутних даних для третьої зони		50	с
Параметри валідації даних	Рівень значень	α	0,95	
	Точність		0,01	

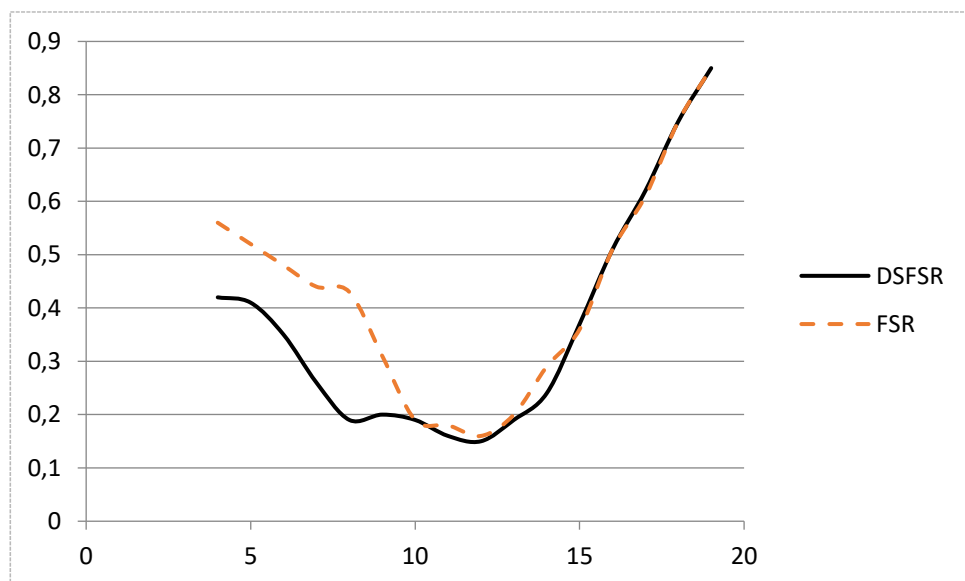
Таблиця 3.2 - Налаштування імітаційної моделі

3.4.1 Дослідження впливу щільності мережі на якість обслуговування

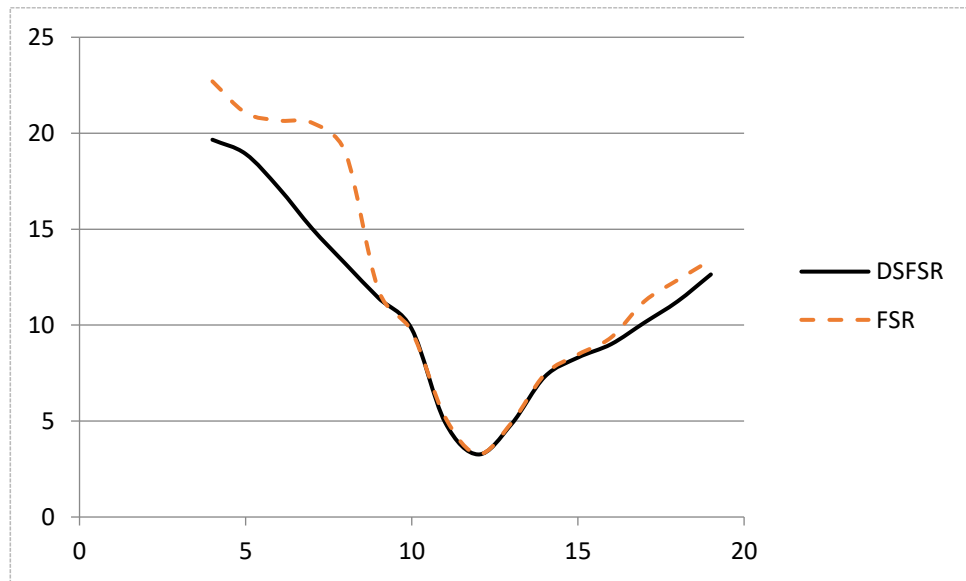
У цьому дослідженні щільність мережі оцінюється як середня кількість "сусідів" для влаштування мережі. Для зміни цього параметра змінювалася площа території, на якій працює бездротова мережа. Під час розглянутого експерименту змінюється ще один важливий параметр - діаметр мережі. Результати експерименту представлені в таблиці 3.3.

Щільність	DSFSR			FSR		
	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального відсотка втрат	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального відсотка втрат
4	0,42	19,66	1,54	0,56	22,7	1,59
5	0,41	18,92	1,45	0,52	21,06	1,47
6	0,35	17,14	1,43	0,48	20,66	1,44
7	0,26	15,03	1,38	0,44	20,54	1,38
8	0,19	13,2	1,35	0,43	19,01	1,36
9	0,2	11,41	1,33	0,31	11,81	1,33
10	0,19	9,79	1,32	0,19	9,67	1,32
11	0,16	4,94	1,28	0,18	5,21	1,29
12	0,15	3,26	1,26	0,16	3,28	1,26
13	0,19	4,84	1,23	0,2	4,91	1,24
14	0,24	7,31	1,2	0,29	7,43	1,21
15	0,37	8,31	1,21	0,36	8,47	1,2
16	0,51	9,01	1,19	0,51	9,36	1,21
17	0,62	10,13	1,11	0,61	11,24	1,08
18	0,75	11,24	1,05	0,75	12,35	1,01
19	0,85	12,64	0,98	0,85	13,39	0,91

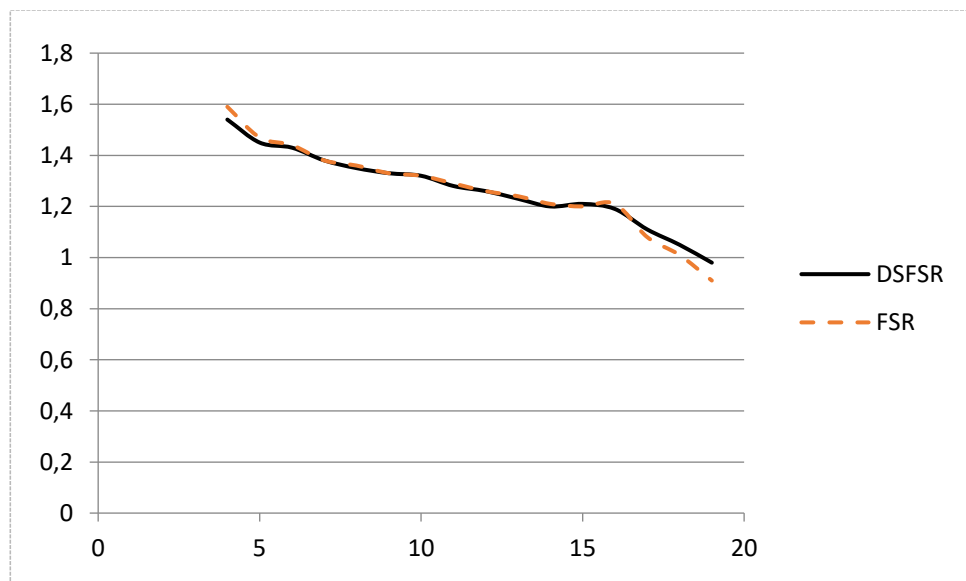
Таблиця 3.3 – Якість доставки даних при змінній щільності



Графік 3.1 - Якість доставки даних при зміні щільності від критерію
максимального середнього часу доставки



Графік 3.2 - Якість доставки даних при зміні щільності від критерію
максимального часу доставки



Графік 3.3 - Якість доставки даних при зміні щільності від критерію
максимального відсотка втрат

У мережі з високою щільністю протоколи маршрутизації можуть працювати більш ефективно, так як в цьому випадку використовується відносно невелика кількість проміжних вузлів-маршрутизаторів. Проте в таких мережах збільшується ймовірність виникнення колізій, що знижує ефективність роботи мережі. У мережах з високою щільністю протоколи

маршрутизації показують приблизно однакові значення критеріїв оцінки якості. При зменшенні щільності мережі ймовірність колізії зменшується, однак зростає число ретрансляція через проміжні вузли. Для мереж з невеликою щільністю використовуваний протокол маршрутизації відіграє вирішальну роль.

У даному експерименті в якості базового розглядається протокол FSR. Протокол DSFSR є модифікацією протоколу FSR. Цей протокол використовує більш ефективну схему попереджувального збору маршрутної інформації. Використовуваний метод, однак, більш накладні за обсягом службового трафіку. Тому такий протокол більш ефективний у мережах з невеликою щільністю і великим діаметром, де ефективність попереджувального методу збору маршрутних даних зростає, а вплив накладних витрат зменшується, у зв'язку із загальним зменшенням імовірності виникнення колізій.

Протокол DSFSR дозволяє отримати значення якості обслуговування до 48% краще для критерію максимального середнього часу доставки, до 31% для критерію максимального відсотка втрат.

3.4.2 Дослідження впливу мережевого навантаження на якість обслуговування

У розглянутій мережі бітова швидкість передачі даних між пристроями становить 1024 Кбіт/с. З урахуванням того, що всі дані доставляються в єдиний центр обробки, а мережа складається з 100 пристроїв, максимальна швидкість передачі для одного пристрою становить $V_{\max} = \frac{1024}{8 \cdot 100} = 1.28$ кілобайт в секунду або 1311 байт в секунду. Однак через помилки, колізій і накладних витрат на роботу протоколів така швидкість практично недосяжна, і буде використовуватися тільки як міра оцінки верхньої межі швидкості передачі.

У процесі доставки пакета останній пройде через кілька вузлів: джерело - маршрутизатор 1 - маршрутизатор2 - ... - маршрутизаторN - приймач. При кожному стрибку пакет буде займати середу двічі - під час прийому, і під час

передачі. Таким чином за 100% завантаження мережі приймемо швидкість передачі 656 байт в секунду для кожного пристрою.

У першому експерименті буде досліджено поведінку мережі при зміні частоти появи пакетів. У цьому експерименті досліджувався вплив частоти появи пакетів з корисними даними на якість обслуговування мережі. Дослідження проводилося для мережі з великою щільністю, тому що в такій мережі протоколи маршрутизації показують найбільш подібні значення якості, тобто мінімізовані інші фактори, що впливають на ефективність роботи мережі. Значення критеріїв якості обслуговування представлені в таблиці 3.4.

Навантаження	DSFSR			FSR		
	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального процента втрат	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального процента втрат
70	5,25	50,24	9,38	5,21	49,42	8,59
60	4,31	42,35	6,91	4,25	42,27	5,83
50	4,01	35,3	4,48	3,97	35,24	4,35
40	3,35	25,74	3,46	3,28	24,71	3,11
30	2,97	20,11	2,74	2,98	20,54	2,7
20	1,77	14,98	2,52	1,87	15,48	2,52
16	1,47	14,01	2,3	1,57	14,27	2,31
12	1,25	12,87	2,08	1,25	13,21	2,11
6	1,09	11,9	1,86	1,11	11,98	1,87
4	0,87	10,92	1,64	0,94	11,23	1,62
3	0,82	9,87	1,42	0,86	10,51	1,41
2	0,82	9,71	1,2	0,86	11,05	1,21
1	0,83	9,58	0,98	0,85	12,87	0,99

Таблиця 3.4 – Якість доставки даних при зміні мережевого навантаження

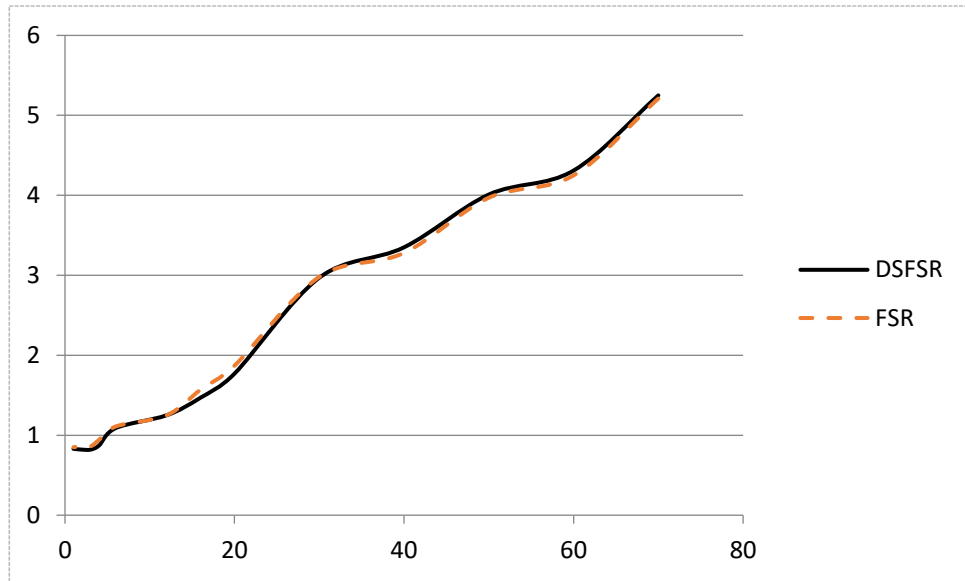


Рисунок 3.4 – Якість доставки даних при зміні навантаження від критерію максимального середнього часу доставки

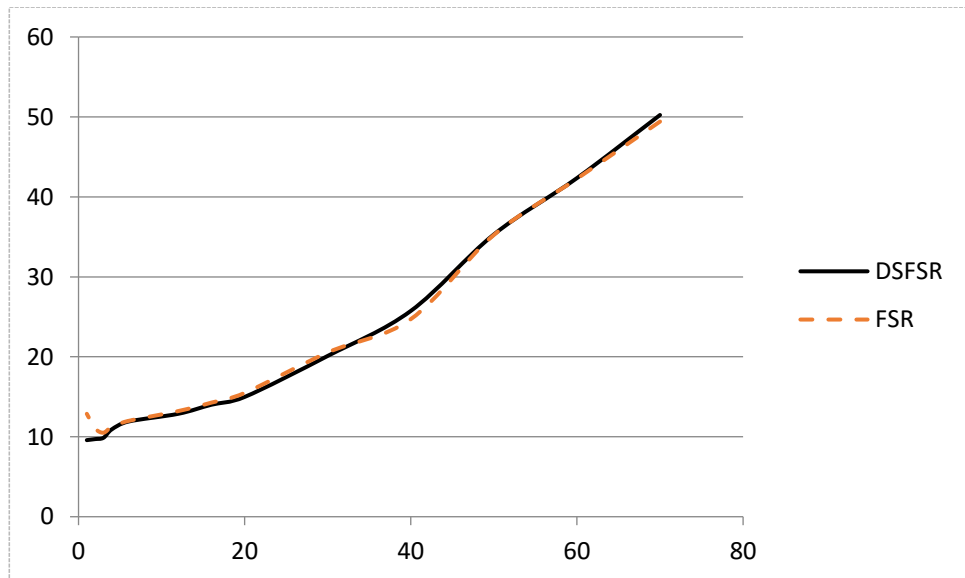


Рисунок 3.5 – Якість доставки даних при зміні навантаження від критерію максимального часу доставки

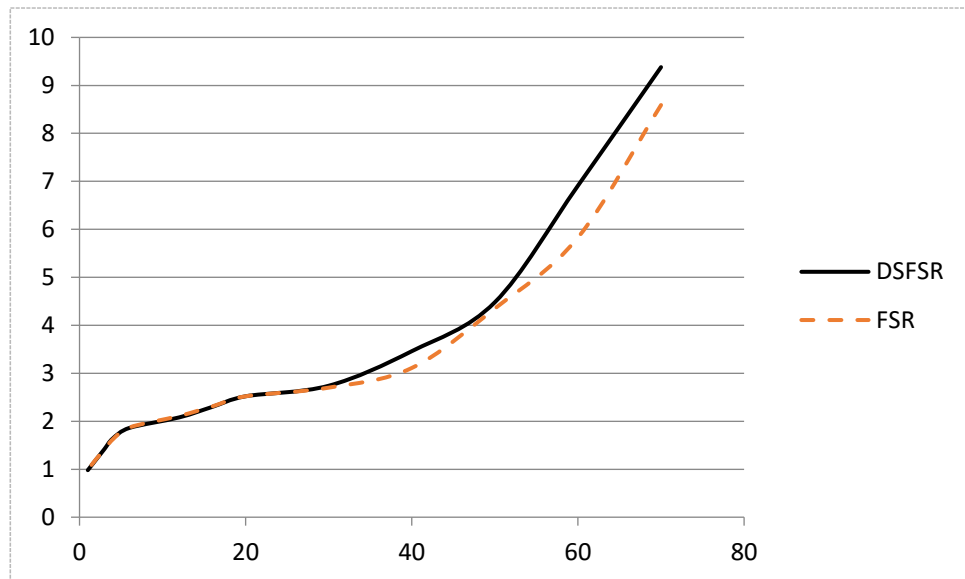


Рисунок 3.6 – Якість доставки даних при зміні навантаження від критерію максимального відсотка втрат

При збільшенні частоти появи даних збільшується час доставки пакетів через каналний рівень передачі, оскільки середовище більший час зайнята, а також зростає ймовірність колізій. Однак при зменшенні частоти появи корисних даних ефективність роботи мережі може зменшитися, оскільки при рідкісному появі пакетів протоколу маршрутизації складніше обчислити метрики каналів. Це може виражатися в неправильному призначенні метрик для каналів, а також у їх більш частих змінах. Такі особливості призначення метрик можуть провокувати вибір невірних маршрутів, а також поява циклів при доставці пакетів до вузла призначення. Протокол DSFSR в ряді випадків показує кращу ефективність, так як швидше реагує на зміну стану каналів.

3.4.3 Дослідження впливу розміру пакетів на якість обслуговування

У даному експерименті перевірялася залежність якості обслуговування мережі від розміру пакетів з корисними даними. При цьому мережева навантаження змінювалася від 5.3% до 80%. Результати представлені в таблиці 3.5.

Завантаження	DSFSR			FSR		
	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального процента втрат	Критерій максимального середнього часу доставки	Критерій максимального часу доставки	Критерій максимального процента втрат
80	5,24	48,67	10,25	4,97	45,97	9,93
65,5	4,15	41,79	7,38	4,01	40,12	7,02
50	3,98	35,21	4,48	3,78	35,18	4,35
40	3,24	25,57	3,01	3,34	28,92	2,72
30	2,84	19,89	2,71	2,89	22,57	2,7
20	1,74	14,68	2,42	1,91	15,29	2,45
16	1,46	13,69	2,34	1,49	13,79	2,46
12	1,21	12,58	2,07	1,37	13,24	2,17
6	1,06	11,87	1,84	1,14	11,97	1,86
5,3	0,84	10,9	1,62	0,88	11,01	1,63

Таблиця 3.5 – Якість доставки даних при зміні розміру пакетів

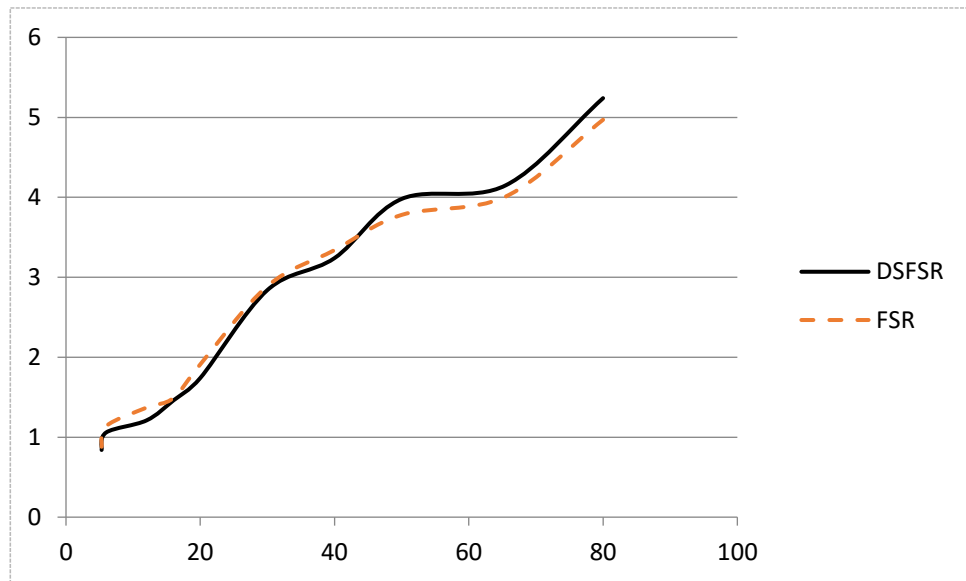


Рисунок 3.7 – Якість доставки даних при зміні розміру пакету від критерію максимального середнього часу доставки

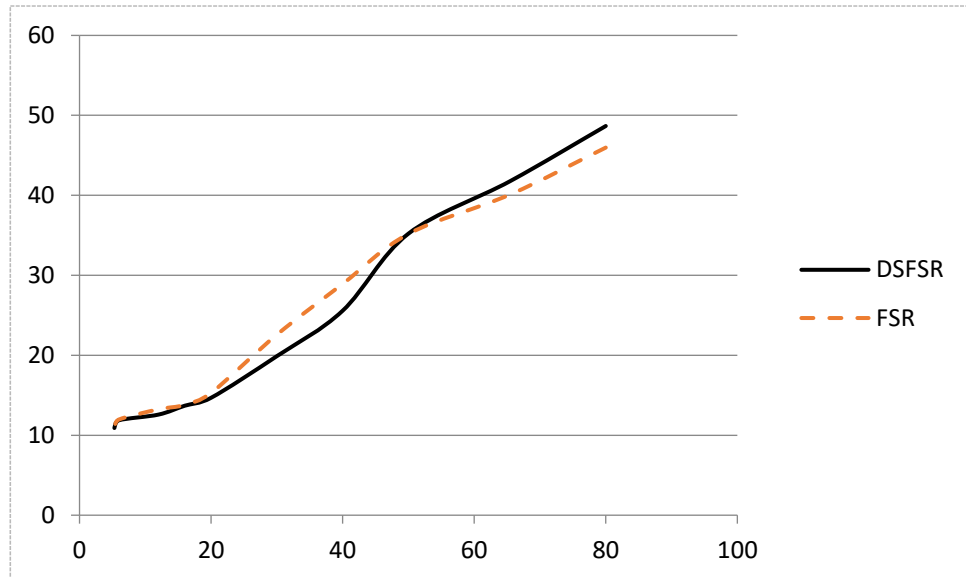


Рисунок 3.8 – Якість доставки даних при зміні розміру пакету від критерію максимального часу доставки

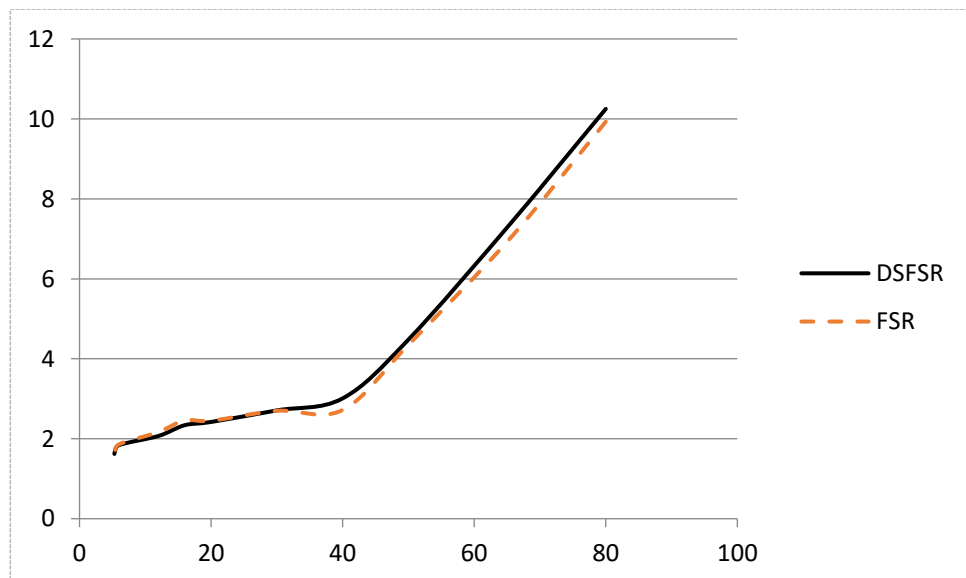


Рисунок 3.9 – Якість доставки даних при зміні розміру пакету від критерію максимального відсотка втрат

При збільшенні розміру пакетів найбільший вплив на ефективність надають, як правило, не протоколи маршрутизації, а технологія доступу до середовища передачі. Однак у кожному разі, використовуваний протокол маршрутизації впливає на якість роботи мережі, так як тільки від нього залежить кількість службового трафіку, а також обраний маршрут для доставки, який у свою чергу залежить від метрики каналу, яка визначається, в тому числі, розміром переданих пакетів .

Як видно з результатів експерименту, в деяких випадках протокол DSFSR забезпечує кращу якість обслуговування, так як модифікований спосіб доставки маршрутної інформації дозволяє більш ефективно використовувати канали передачі. Проте можливі ситуації, коли такий алгоритм показує меншу ефективність, оскільки збільшує накладні витрати.

Висновки до розділу

У цьому розділі була реалізована імітаційна модель бездротової сенсорної мережі. Були розглянуті існуючі системи імітаційного моделювання, їх переваги і недоліки. Для моделювання розглянутих мереж була обрана система DaSSF. За допомогою реалізованої імітаційної моделі були отримані параметри якості передачі даних для мереж, що використовують протоколи FSR і DSFSR.

ВИСНОВКИ

У моїй дипломній роботі розглянуто розвиток алгоритмів маршрутизації у мобільних 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 мобільних сенсорних мереж.

Основними перевагами систем на основі сенсорних мереж є:

- Можливість розміщення в важкодоступних місцях, куди важко і дорого проводити звичайні проводові рішення;
- Оперативність і зручність розгортання і обслуговування системи;
- Надійність мережі – у разі відмови одного елемента мережі, інформація буде передана через інший;
- Високий рівень проникнення через фізичні і стійкість до електромагнітних завад;
- Тривала робота без заміни елементів живлення.

2) У другому розділі розглядалися алгоритми маршрутизації у мобільних сенсорних мережах та була виконана класифікація протоколів маршрутизації, які використовуються в різного типах мереж для вирішення завдань БСМ.

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

3) У третьому розділі була виконана імітаційна модель мобільної сенсорної мережі. Були розглянуті існуючі системи імітаційного моделювання, їх переваги і недоліки. Спираючись на проведене моделювання, можна зробити висновки, що найефективнішими з точки

зору збереження енергії є протоколи на основі місцезнаходження, ієрархічні забезпечують найкращу масштабованість, а прості – відмовостійкість, завдяки знаходженню резервних шляхів між джерелом та місцем призначення. Отже, вибір протоколів маршрутизації в БСМ виконується на основі застосування, тобто мети розгортання конкретної безпроводової мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Heinzelman W.S., Kulik J., Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks // Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. Seattle (USA), 1999. P. 174-185.
2. Karp B., Kung H. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks // Proceedings of the 6th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. Boston (USA), 2000. P. 243-254.
3. Ko Y, Vaidya N. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks // Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. Dallas (USA), 1998. P. 66-75.
4. Routing with guaranteed delivery in ad,hoc wireless networks / P. Bose [et al.] // Wireless Networks. 2001. Vol. 7. P. 609-616.
5. Geographical and energy-aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks: Technical report 01-0023 / University of California (Los Angeles); Yu Y, Estrin D., Govindan R. 2001. 1 i p .
6. Chang J.-H., Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks // IEEE/ACM transactions on networking. 2004. Vol. 12, no. 4. P. 609-619.
7. Aslam J., Li Q., Rus D. Three power-aware routing algorithms for sensor networks // Wireless communications and mobile computing. 2003. Vol. 3, no. 2. P. 187-208.
8. Misra A., Banerjee S. MRPC: maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments // Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference. Orlando, (USA), 2002. P. 800-806.
9. Distributed energy adaptive routing for wireless sensor networks / C Ok [et al.] // Proceedings of the IEEE international conference on automation science and engineering. Scottsdale (USA), 2007. P. 905-910.
10. Puccinelli D., Sifakis E., Haenggi M. A cross-layer approach to energy balancing in wireless sensor networks // Workshop on networked embedded sensing and control. Notre Dame (USA), 2005. P. 1-17.
11. Dai H., Han R. A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor networks // Proceedings of the IEEE global telecommunications conference. San Francisco (USA), 2003. Vol. 1. P. 548-552.
12. Cao Q., Abdelzaher T. A scalable logical coordinates framework for routing in wireless sensor networks // Proceedings of the 25th IEEE international realtime systems symposium. Lisbon (Portugal), 2004. P. 349-358.

13. Cao Q., Abdelzaher T. Scalable logical coordinates framework for routing in wireless sensor networks // ACM transactions on sensor networks. 2006. Vol. 2, no. 4. P. 557-593.
14. Al-Karaki J., Kamal A. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey // IEEE wireless communications. 2004. Vol. 11, no. 6. P. 6-28.
15. Akkaya K., Younis M. A survey of routing protocols in wireless sensor networks // Ad hoc networks. 2005. Vol. 3, no. 3. P. 325-349.