

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

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

«На правах рукопису»

УДК __621.382_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах на
основі використання адаптивного алгоритму кластеризації»

Виконав:

студент II курсу, групи ТЗ-01мп

Штойко Олександр Олександрович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК, професор, д.т.н.,

Лисенко Олександр Іванович _____

Рецензент:

Старший науковий співробітник, д.т.н.,

Скулиш Марія Анатоліївна _____

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

Студент _____

Київ – 2021 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Штойко Олександр Олександровичу

1. Тема дисертації «Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах на основі використання адаптивного алгоритму кластеризації», науковий керівник дисертації професор кафедри ТК Лисенко Олександр Іванович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «04» листопада 2021 р. № 3672-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2021 р.
3. Об'єкт дослідження бездротові сенсорні мережі
4. Предмет дослідження методи маршрутизації на основі алгоритму кластеризації
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Аналіз сучасного стану методів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах
 2. Розглянути існуючі методи та порівняти їх, сформулювати рекомендації по вибору кінцевих рішень
 3. Дослідити шляхи підвищення ефективності існуючих методів маршрутизації на основі застосування алгоритму кластеризації
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація на тему: «Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах на основі використання адаптивного алгоритму кластеризації» .

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- 1) Штойко А. А., Петрова В. Н. Развитие алгоритмов маршрутизации в мобильных сенсорных сетях. Наукові праці Другої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 19 грудня 2019 р. (Київ, Україна). – К. : НУХТ, 2019. – С. 315-319. ISBN 978-83-956296-0-0(Польща)
- 2) Штойко А.А., Петрова В.Н. Развитие алгоритмов маршрутизации в мобильных сенсорных сетях. XIV Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –ISSN (print) 2663-502X . ISSN (online) 2664-3057. С. 295-297.
- 3) Штойко А. А., Петрова В. Н. «Усовершенствованные алгоритмы маршрутизации в сенсорных сетях с мобильными элементами». Проблеми інформатизації: Матеріали п'ятнадцятої міжнародної науково-технічної конференції., 9 – 10 квітня 2020 року. - Київ : НАУ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ: Білорусь: БДАЗ, 2020. – С. 123-124
- 4) Штойко А. А. , Петрова В. Н. Алгоритмы маршрутизации для сенсорных сетей с мобильными элементами. V - Міжнародна науково-практична конференція «Відкриті еволююючі системи», 19 - 21 травня 2020 р, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського . - С.134-137.
- 5) РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Штойко О.О., Лисенко О. І. ПТ-2021: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – с.307-309

9. Дата видачі завдання 13.10.2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Збір інформації про безпроводові сенсорні системи в інфокомунікаційних системах	13.10.2020 - 01.12.2020	виконано
2	Вивчення особливостей маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах	01.12.2020 – 01.03.2021	виконано
3	Аналіз існуючих методів маршрутизації та порівняння	01.03.2021 – 23.04.2021	виконано
4	Розробка рекомендації з алгоритму кластеризації	23.04.2021 - 01.06.2021	виконано
5	Пошук методів підвищення ефективності вибору алгоритмів та підвищення стабільності	02.06.2021 - 01.08.2021	виконано
6	Обробка та систематизація одержаних даних, написання загальних висновків	02.08.2021 - 21.10.2021	виконано
7	Підведення підсумків, оформлення текстової і графічної частини магістерської дисертації	22.10.2021 - 09.12.2021	виконано

Студент

Олександр ШТОЙКО

Науковий керівник дисертації

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської дисертаційної роботи: 106 с., 59 рис., 15 таблиць та 56 джерел.

Мета роботи – розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах на основі використання алгоритму кластеризації.

В даній роботі розглянуто основні особливості та вимоги до процесу маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Проаналізовані параметри маршрутизації в залежності від призначення мережі. Запропоновано способи розвитку конкретної маршрутизації мережі.

Ключові слова: БСМ, кластеризація, маршрутизація.

ABSTRACT

The work includes 106 pages, 59 pictures, 15 tables and 56 information sources.

The purpose of the work is the development of routing methods in mobile sensor networks based on the use of the clustering algorithm.

This paper considers the main features and requirements for the routing process in wireless sensor networks. The routing parameters depending on the network destination are analyzed. Ways to develop a specific network routing are proposed.

Keywords: WSN, clustering, routing.

ЗМІСТ

ВСТУП	14
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБІТ В ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ ДИСЕРТАЦІЇ	22
1.1. Архітектура бездротових сенсорних мереж	23
1.2. Додатки бездротових сенсорних мереж.....	26
1.3. Характеристики архітектури та класифікація бездротових сенсорних мереж	27
1.4. Маршрутизація в бездротових сенсорних мережах	29
1.5. Проблеми планування і маршрутизації в бездротових сенсорних мережах.....	31
1.6. Гомогенні і гетерогенні БСМ.....	34
1.6.1 Типи гетерогенних ресурсів	34
1.6.2 Вплив неоднорідності сенсорних вузлів на БСМ.....	35
1.7 Кластеризація БСМ	35
1.7.1 Задачі роботи.....	37
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ГОМОГЕННИХ І ГЕТЕРОГЕННИХ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	39
2.1. Огляд досліджень бездротових сенсорних мереж.....	39
2.2. Класифікація алгоритмів маршрутизації в БСМ	40
2.2.1. Алгоритми маршрутизації на основі мережевої структури	41
2.3. Порівняльний аналіз алгоритмів DT, LEACH, SEP, DEEC, TEEN	50
2.3.1 Перший сценарій.....	51
2.3.2 Другий сценарій.....	56
2.3.3. Третій сценарій	58
РОЗДІЛ 3. АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ З МОБІЛЬНИМИ ВУЗЛАМИ.....	62
3.1. Мобільні Бездротові Сенсорні Мережі (MWSN).....	62
3.1.1. Різні випадки мобільності	64
3.1.2. Моделі мобільності	65
3.2. Адаптивний алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами (МАСА)	66
3.2.1. Модель для дослідження алгоритму МАСА	66
3.2.2. Комбінований критерій прогнозування.....	67
3.2.3. Алгоритм МАСА.....	68

3.3.	Результати моделювання	70
3.3.1.	Тривалість життєвого циклу мережі	71
3.3.2.	Період стабільності	72
3.3.3.	Число успішно переданих пакетів.....	73
РОЗДІЛ 4. ВІДМОВОСТІЙКИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ		74
4.1.	Огляд досліджень в предметній області	74
4.2.	Алгоритм TEEN	77
4.2.1.	Фаза формування кластеру	77
4.2.2.	Фаза передачі даних (Steady-state phase)	78
4.3.	Алгоритм FT-TEEN.....	78
4.3.1.	Модель для дослідження алгоритму FT-TEEN.....	79
4.3.2.	Фаза формування кластера. Вибір головного (CH) і резервного головного (sub-CH) вузлів кластера	79
4.3.3.	Фаза передачі даних.....	81
4.3.4.	Виявлення та відновлення помилок	82
4.4.	Результати моделювання	83
РОЗДІЛ 5. ПОКРИТТЯ, ЗВ'ЯЗНІСТЬ І ЩІЛЬНІСТЬ В ДВОВИМІРНИХ І ТРИВИМІРНИХ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....		89
5.1.	Огляд досліджень в предметній області.....	89
5.2.	Стратегії розташування БСВ в двовимірному і тривимірному просторах.....	91
5.3.	Співвідношення між радіусом покриття сенсорного вузла, часткою покриття і щільністю в 2D і 3D БСС	92
5.3.1.	Двовимірна БСМ.....	92
5.3.2.	Тривимірна БСМ.....	94
5.4.	Зв'язність мережі	97
5.5.	Співвідношення між радіусом покриття і дальністю зв'язку	98
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ		102
6.1.	Опис ідеї стартап проекту	102
6.2.	Аналіз можливостей ринку.....	104
Висновки		106
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ		107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		109

Актуальність теми дослідження. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) вважаються одним з найважливіших технологічних досягнень ХХІ ст. За останнє десятиліття концепція бездротових сенсорних мереж отримала широке визнання у світі науки та промисловості по всьому світу.

Основним посилом БСМ є заперечення безпосередньої участі людини у зборі даних, наприклад, через неможливість присутності людини в певному місці або виконання технічного процесу, особливо якщо це необхідно для збору довгострокової інформації. Використовуючи БСМ, користувачі можуть вивчати події та методи, а також отримати доступ до інформації, яка може бути як простою (вимірювання тиску, так і складною (з використанням військових параметрів).

Сьогодні бездротові сенсорні мережі WSN (*Wireless Sensor Networks*) є передовим методом збору даних для різних застосувань, таких як військові, сільськогосподарські, екологічні, транспортні, медичні тощо.

Кожен датчик збирає дані про навколишнє середовище і передає їх до шлюзів або базових станцій (БС) безпосередньо або через інші датчики. Вони, як правило, мають обмежені можливості для електропостачання та його відновлення. Тому вибір способу організації передачі інформації між датчиками і шлюзами або базовими станціями є одним з основним науковим питанням при створенні бездротових сенсорних мереж.

Бездротові сенсорні вузли використовують енергію для передачі, обробки повідомлень та обробки даних. Термін служби датчика фундаментально залежить від терміну служби батареї. Енергія, що використовується під час передачі повідомлень, може становити 3/4 від існуючого ресурсу. У той же час необхідно вирішувати завдання обміну повідомленнями та їх логістичному маршруту.

Сенсорна мережа, яку останнім часом часто називають сенсорним полем, може складатися з тисячі і більше вузлів. Відповідно до специфікацій протоколу Zig Bee, сенсорна мережа може складатися з 64 000 (шістдесят чотири тисячі) вузлів. Як вже зазначалося вище, БСМ мають обмежені ресурси: це обмежена потужність системи живлення, малий рівень передачі даних, низький обсяг пам'яті, тощо. Ці обмеження напряму мають вплив на розробку протоколів і алгоритмів, що застосовуються в БСМ. Тому розроблені алгоритми для БСМ мають ефективно функціонувати на дуже

обмежених апаратних пристроях. При цьому більшість часу датчики перебувають у стані спокою, що вимагає використання самоорганізуючих мереж для роботи БСМ.

Кластеризація, як виявилось, є одним з ключових методів створення БСМ. Робота такої БСМ (кластеризованої) часто залежить від алгоритму вибору датчика - лідера, найважливішими вимогами є гарантія максимального життєвого циклу мережі та максимального покриття. Треба зауважити, що в кластерних БСМ алгоритм вибору датчика - лідера фактично підлаштовується під протокол маршрутизації повідомлення. Загалом, вимоги до алгоритму вибору датчика - лідера можуть бути представлені у такому вигляді:

- Алгоритм має бути масштабованим і ефективно працювати для кластерів будь-якого розміру;
- Алгоритм має зменшити обчислювальну складність для датчиків, тим самим збільшивши термін служби мережі;
- Алгоритм має бути максимально простим і незалежити від апаратних можливостей вузлів;
- Алгоритм має обмежувати кількість необхідних передач, таким чином збільшуючи термін служби мережі.

На сьогоднішній день створено велику кількість алгоритмів вибору головного вузла, переважно для БСМ зі стаціонарними сенсорними вузлами. Змістовний вклад у розробку принципів побудови БСМ, а також алгоритмів вибору головного вузла внесли А. Е. Кучерявий, А. Салім, Е. А. Кучерявий, В. А. Мочалов, Д. А. Молчанов, П. А. Абакумов, Yonis, W. Heinzelman, D. Kim, M. Lindsey.

Проте досі, кілька питань, пов'язаних з розробкою ефективних алгоритмів кластеризації для мобільних мереж, які не відповідають алгоритмам безпеки, все ще потребують вирішення цього питання. Через те що, кластеризація використовується для БСМ з високим рівнем щільності, важливо також удосконалити процес розміщення датчиків, що гарантує необхідне покриття.

У зв'язку з викладеним дослідженням, спрямованим на розробку нових алгоритмів вибору датчика-лідера і методики розташування сенсорів для доцільної кластеризації БСМ, є актуальним.

Мета роботи і завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробці алгоритмів вибору головного вузла в БСМ для мереж з мобільними вузлами, відмовами і розробці методики розміщення сенсорних вузлів, що забезпечує необхідне покриття простору.

Для досягнення поставленої мети в даній дисертації покроково вирішуються такі пункти:

1. Аналіз актуального стану в сфері досліджень БСМ, визначення передових характеристик і структури БСМ;
2. Аналіз відомих алгоритмів маршрутизації, самоорганізації і вибору датчика-лідера кластера в БСМ;
3. Розробка нового адаптивного алгоритму кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними датчиками, що базуються на критерії прогнозування і значення придатності сенсорного вузла;
4. Порівняльний аналіз і оцінка алгоритмів прямої передачі DT і кластеризації *LEACH*, *SEP*, *TEEN*, *DEEC* в гомогенній, дворівневій і багаторівневій гетерогенній сенсорних мережах;
5. Розробка нового відмовостійкового алгоритму кластеризації для бездротових сенсорних мереж (*FT-TEEN*);
6. Аналізування періоду тривалості життєвого циклу мережі, періоду стабільності і пропускну здатності БСМ базуючись на дані про відношення між радіусом покриття і радіусом дальності зв'язку.
7. Дослідження характеристик зв'язності, щільності і покриття в двовимірних (*2D*) і тривимірних (*3D*) бездротових сенсорних мережах з ціллю розробити методику розміщення датчиків, яка буде мати змогу забезпечувати, хоча б, 90% покриття для *2D* і *3D* БСМ;

Об'єкт роботи. Бездротові сенсорні мережі.

Предмет роботи. Алгоритми кластеризації і покриття в бездротових сенсорних мережах.

Наукова новизна роботи складається з таких наукових результатів:

1. Розроблено відмовостійкий алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж під назвою *FT-TEEN*; що відрізняється від відомого алгоритму *TEEN* тим, що в його складі присутня функція резервування головних вузлів кластера, їх назначення і відновлення відмов в БСМ, що дозволяє значенню кількості пакетів стати більшим, що були успішно отримані як в головних вузлах кластерів, так і на базовій станції;
2. Розроблено методику розташування датчиків для плоских (2D) і об'ємних (3D) БСМ, що мають відмінність від відомих тим, що забезпечується, мінімум, 90% покриття простору в залежності від співвідношення щільності розміщення і радіусу дії сенсорного вузла R_S .
3. Розроблено алгоритм кластеризації, що здатен адаптуватися, для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами під назвою *MACA*, що має відмінність, яка представляє собою комплексне застосування відомих раніше комбінованого критерію прогнозування і значення придатності датчика для виконання ролі датчика-лідера, який за рахунок комплексного використання зазначених вище величин гарантує збільшення тривалості періоду стабільності і збільшення життєвого циклу в порівнянні з відомими раніше аналогами.

Теоретична і практична значимість дослідження. Теоретична значимість роботи полягає в розробці та дослідженні нового алгоритму вибору головного вузла кластера в БСМ з мобільними головними вузлами, що забезпечує більше значення тривалості життєвого циклу, зменшення втрат пакетів і збільшення тривалості періоду стабільності в порівнянні з відомими алгоритмами, відмовостійкого алгоритму, що використовує резервні головні вузли для збільшення числа пакетів, успішно отриманих як в головних вузлах кластерів, так і на базовій станції, а також визначенні методики розміщення сенсорних вузлів для двовимірних і тривимірних БСМ, що відрізняється від відомих тим, що забезпечується, що найменше, 90% покриття простору в залежності від співвідношення щільності розміщення і радіусу дії сенсорного вузла R_S . Практична цінність роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для планування і проектування БСМ.

Методи дослідження. Щоб вирішити завдання, які ми поставили в науковій роботі, ми використовували існуючі сучасні методи обчислювальної геометрії, прогнозування та імітаційного моделювання, тощо. Як інструменти моделювання виступають актуальні програмні пакети *C # Visual.NET* та *MATLAB* останніх версій, в цілях візуалізації результатів, які були отриманні під час дослідження, застосовували програмне забезпечення *Microsoft Excel* останньої версії.

Основні положення, що виносяться на захист:

- Адаптивний алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами *MACA*, який дає змогу забезпечити значне підвищення тривалості життєвого циклу та збільшити тривалості періоду стабільності, якщо порівнювати з існуючими алгоритмами бездротових сенсорних мереж (*DCA*, *LEACH-mobile*);
- Відмовостійкий алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж *FT-TEEN* забезпечує збільшення числа пакетів, які вдало надійшли, як на головні вузли кластерів, так і на базову станцію в порівнянні з базовим алгоритмом *TEEN*;
- Методика розміщення сенсорних вузлів, що забезпечує, приблизно, 90% покриття для двовимірних (*2D*) і тривимірних (*3D*) бездротових сенсорних мереж, якщо порівнювати у співвідношенні щільності розміщення до її радіусу дії нашого сенсорного вузла R_s .

Короткий зміст роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, розглянуто стан досліджуваної проблеми, формуються мета і завдання роботи, перераховані основні наукові результати роботи, визначена наукова новизна і практична цінність результатів, описана область їх застосування, представлені основні положення, що виносяться на захист, описана структура дисертації і її обсяг.

У першому розділі роботи проаналізовано основні характеристики сучасних БСМ і існуючі роботи в предметній області. Наводиться інформація про концепцію Інтернету Речей (*IoT*), архітектура і додатки бездротових сенсорних мереж, розглядаються класифікація бездротових сенсорних мереж, проблеми проектування і

маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, аналізуються особливості гомогенних і гетерогенних БСМ, методи кластеризації.

У другому розділі проводиться оцінка та аналіз вже існуючих методів маршрутизації, які широко використовуються у бездротових сенсорних мережах, які обладнані стаціонарними вузлами на площині. Порівняння алгоритмів використаних у магістерській роботі здійснювалось за результатами моделювання у середовищі *MATLAB* останньої версії. Основними показниками, які враховувались у порівнянні, були тривалість стабільного періоду функціонування сенсорної мережі і залишкова енергія на вузлах нашої мережі. Нами аналізуються алгоритм прямої передачі *DT* і найбільш відомі існуючі алгоритми кластеризації *LEACH* (*Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy*), *SEP* (*Stable Election Protocol*), *DEEC* (*Distributed Energy Efficient Clustering*) і *TEEN* (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol*). Порівняння алгоритмів проводиться для гомогенної, дворівневої і багаторівневої гетерогенної сенсорних мереж.

У третьому розділі розроблено новий адаптивний алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами під назвою *MACA* (*Mobility Adaptive Clustering Algorithm*).

Сучасними науковцями уже зроблено багато досліджень, які присвячено проблемам бездротових сенсорних мереж зі стаціонарними вузлами. Але ми виявили проблему, що існуючі технології для Інтернету Речей можуть включати в себе застосування більш ресурсних додатків, які вимагають більшої мобільності їх бездротових вузлів.

Кластерна архітектура знайшла застосування і в мобільних сенсорних мережах (*MWSNs*), тому пошук найкращих варіантів організації кластера і вибір головного вузла для *MWSN* є сьогодні актуальним завданням.

Розроблений алгоритм заснований на поєднанні кращих властивостей двох відомих існуючих алгоритмів - *DCA* (*Distributed Clustering Algorithm*) та *MBC* (*Mobility-Based Clustering*).

Четвертий розділ присвячений розробці відмовостійкого алгоритму кластеризації для бездротових сенсорних мереж.

У бездротових сенсорних мережах (БСМ) з кластерною архітектурою головні вузли кластерів грають важливу вагу в процесі для функціонування нашої мережі і якісної маршрутизації даних. Звісно, будь-які збої, які можуть відбутись у будь-який момент, у функціонуванні цих дуже важливих вузлів впливають на якість потенційно предоставлених послуг і надійність нашої мережі, і звісно навіть можуть привести до відмови нашої мережі в загалом. Відмовостійкість є однією з ключових проблем в області проектування і експлуатації бездротових сенсорних мереж БСМ. Відмова деяких вузлів в БСМ дійсно неминуча з деяких причин. Одні з них: повна відмова апаратних засобів, енергетичне стомлення вузлів, збій в ПЗ, помилки зв'язку, хакарська атака зі сторони і т.д.

Запропонований алгоритм являє собою модифікований варіант алгоритму *TEEN*, вводить резервний механізм для кластеризації, виявлення і відновлення помилок і складається з трьох фаз.

У п'ятому розділі досліджуються покриття, зв'язність і щільність в двовимірних і тривимірних БСМ.

Невраховуючи той момент, що багато існуючих наукових відкриттів в сфері БСМ в даний час присвячені двовимірному простору (*2D*), насправді такі мережі працюють в тривимірному просторі (*3D*), тим паче, враховуючи появу більш нових додатків, таких як сенсорні мережі, які можуть літати. Плавний перехід від двовимірного до тривимірного простору виявляє безліч нових непропрацьованих проблем у зв'язку з іншою топологією БСМ. Виявлено, що є велика необхідність в нових підходах до оцінки таких характеристик бездротових сенсорних мереж як покриття, зв'язність і щільність. Враховуючи все сказанне, в цьому розділі досліджуються характеристики щільності і зв'язності для БСМ з метою визначення такої методики розміщення по площі сенсорних вузлів, з можливістю забезпечення, хоча б, 90% покриття для двовимірних (*2D*) і тривимірних (*3D*) бездротових сенсорних мереж. Також оцінюються повна тривалість нашого життєвого циклу мережі, період стабільності і пропускна здатність нашої мережі на основі відношення між радіусом покриття (R_S) і радіусом дальності зв'язку (R_C).

У шостому розділі представлена розробка стартап проекту та опис ідеї.

У висновку наводиться опис основних результатів роботи.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BSM	Бездротова сенсорна мережа
BS	Базова станція
IP	Інтернет речей
3G	Технологія мережі рухомого зв'язку третього покоління
3GPP	3rd Generation Partnership Project
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
MatLab	Matrix Laboratory - пакет прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень та однойменна мова програмування, що використовується в цьому пакеті
WSN	Wireless Sensor Network

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБІТ В ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ ДИСЕРТАЦІЇ

В даний момент часу прогрес мереж зв'язку, який можна спостерігати, здійснюється через концепцію Інтернету Речей [1, 6, 14]. Технологічною базою для реалізації концепції Інтернету Речей є бездротові сенсорні мережі [11, 10]. Інтернет речей (*IoT*), в сучасному світі називають інтернетом об'єктів: Машина до машини, машина до інфраструктури, машина до навколишнього середовища і т.д. *IoT* розглядається як мільярди розумних, пов'язаних між собою "речей" (свого роду, можна сказати, що це "універсальна глобальна нейронна мережа" в хмарних сервісах), які охоплюють майже кожен аспект людської життєдіяльності і усього суспільства.

Концепція IP вміщує багато різних додатків, такі як:

- Комунікація від машини до машини;
- Комунікація машини до інфраструктури;
- Телемедицина: дистанційний моніторинг пацієнтів, доставка медикаментів;
- Безперервний моніторинг техніки;
- Автоматична організація дорожнього руху;
- Дистанційна безпека і контроль;
- Екологічний моніторинг і контроль;
- Автоматизація виробництва.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) представляють собою мережі, що самоорганізуються і складаються з безлічі розподілених в просторі бездротових сенсорних вузлів, призначення яких - моніторинг усіх характеристик навколишнього середовища та деяких об'єктів, які розташованих в ньому [12].

Ресурси сенсорних вузлів в бездротових сенсорних мережах являються вичерпними, якщо дивитись з можливості обробки інформації, пропускну здатності, повного обсягу пам'яті, обчислювальних можливостей, що значно відрізняє бездротові сенсорні мережі від інших мереж [17]. Розглянемо далі архітектуру таких мереж.

1.1. Архітектура бездротових сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) складаються з двох основних типів вузлів:

1. Сенсори (або сенсорні вузли), які працюють на території моніторингу (сенсорне поле) для збору даних досліджуваного явища або процесу і їх передачі на БС.

2. БС (базова станція), також відома як шлюз (*Gateway*) або приймач (*Sink*), є інтерфейсом, що поєднує сенсорну мережу з зовнішнім світом через мережу інтернет. БС може бути головною точкою у нашому сенсорному полі, а також перебувати у віддаленому місці від нього. Базова станція бере на себе відповідальність за отримання даних від наших сенсорів, їх обробку і передачу кінцевому користувачеві усіма можливими способами, також включаючи телекомунікаційну мережу онлайн або через супутник та інші існуючі мережі. Структура бездротової сенсорної мережі приведена на рисунку 1.1.

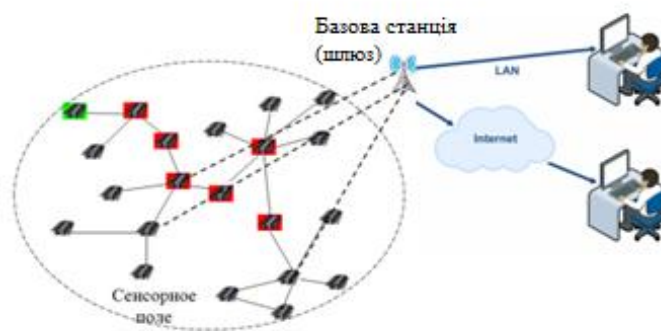


Рис. 1.1 Структура БСМ

Вибір конкретних рішень для організації БСМ першчоргово залежить від наших функціональних можливостей, розміру мережі, витрат, енергетичних характеристик і, важливо враховувати, що при початку такого широкого впровадження сенсорних мереж - від забезпечення стабільної якості обслуговування.



Рис. 1.2 Сенсорні вузли

Ймовірні приклади сучасних конструкцій існуючих сенсорних вузлів приведені на рисунку 1.2, а на рисунку 1.3 можна побачити типову архітектуру сенсорного бездротового вузла, яка поєднує в собі чотири основні компоненти:

- 1) Сенсорної підсистеми, що включає один або декілька сенсорів (з відповідними аналого-цифровими перетворювачами) для отримання і накопичення наших даних;
- 2) Підсистема обробки, що включає мікроконтролери і пам'ять для місцевої обробки даних;
- 3) Радіопередавач для бездротової передачі даних;
- 4) Пристрій електроживлення

Залежно від застосування вибраних сенсорних вузлів, включають можливість включати в себе деякі додаткові компоненти, такі як система зчитування позиціонування, щоб точно визначити їх положення, мобілізатор, щоб змінити їх розташування або конфігурацію (наприклад, орієнтація антени), і т. д. Через те, що останні компоненти додаткові, ми не станемо враховувати їх до уваги в подальшому аналізі нашого моделювання.

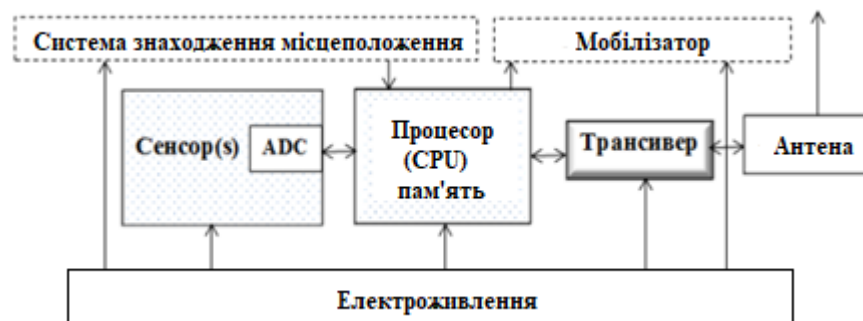


Рис. 1.3 Типова архітектура сенсорного вузла

Сенсорні вузли утворюють однорідне сенсорне поле, зазвичай, вони знаходяться майже в стані спокою. Проте, коли відбувається подія, чи за наших розкладом в конкретний час, наші вузли прокидаються, самоорганізуються в сенсорну мережу і передають певну інформацію до базової станції (див. Рис. 1.4).

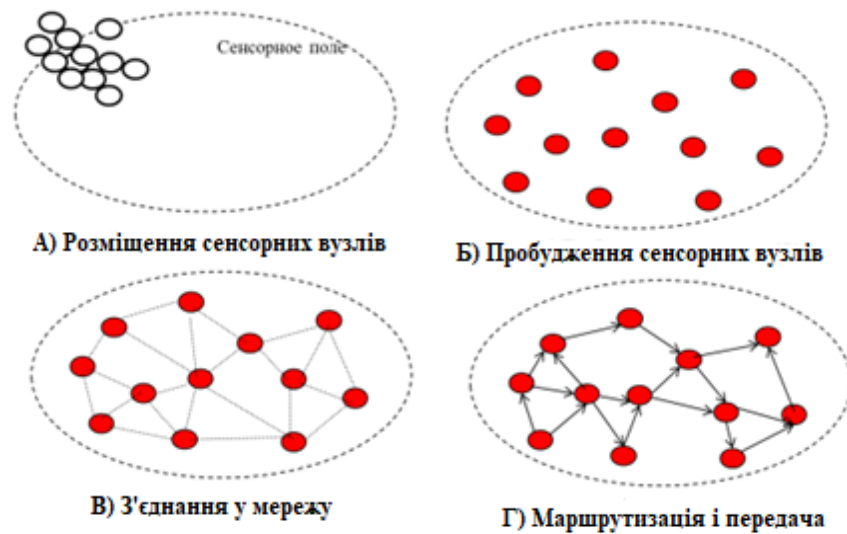


Рис. 1.4 Самоорганізація та передача даних в бездротових сенсорних мережах

1.2. Додатки бездротових сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі можуть складатися з сенсорів різних типів, враховуючи сейсмічний, магнітний, тепловий, візуальний, інфрачервоний, акустичний і радар, які дають змогу контролювати досить велику різноманітність зовнішніх умов, враховуючі наступні показники: температура, вологість, тиск, швидкість, напрямок руху, освітленість, рівень шуму, присутність або відсутність певних видів об'єктів і т.д.

Цей діапазон додатків бездротових сенсорних мереж може бути, здебільшого, розподілений на такі категорії, як: військова, екологічна, захит здоров'я, будівництво, адміністративна охорона. Для порівняння ми розглянули такі ряди додатків БСМ:

- **Спостереження за зовнішнім середовищем.** За допомогою бездротових сенсорних мереж маємо змогу моніторити зміни клімату, пожежонебезпеки в лісах, контролю освітленості, вологості, температури в сільському господарстві і т.д.

- **Військовий моніторинг.** Сенсорні мережі можуть використовуватись у цілях військових спостережень. Додатки БСМ показані на малюнку 1.5.



Рис. 1.5 Додатки БСМ

- **Моніторинг будівель.** Дуже важливу місію з моніторингу житлового фонду, систем водопостачання і т.д. складають величезну частину додатків сенсорних мереж.

- **Контроль здоров'я.** Сенсорні вузли можуть розміщуватися будь-де, наприклад: в будівлях, в лісах і т.д., а також, досить важливо, що вони дають змогу моніторити процеси життєдіяльності в тілі людини, і інших біомас. Одне з найсучасніших та важливих додатків сенсорних мереж має назву *MBAN (Medicine Body Area Network)* і відноситься до робочої групи *IEEE 802.15.6*.

Перелік додатків перераховувати можна ще довго, але вже додатків, які ми розглянули, буде цілком достатньо, щоб зрозуміти масштабний характер сенсорних мереж.

1.3. Характеристики архітектури та класифікація бездротових сенсорних мереж

БСМ можна цілком класифікувати враховуючи різні концепції в залежності від типу вузлів в мережі чи в залежності від середовища, в якому вони перебувають та розгорнуті, а також в залежності від методу розгортання або в залежності від розташування вузлів в мережі і т.д. Тому можна виділити деякі вагомні для майбутньої

розробки алгоритмів вибору головного вузла характеристики бездротової системи мережі.

- **Проактивні і Реактивні БСМ.** Взявши за основу спосіб функціонування та цільового застосування сенсорних мереж їх можна поділити на проактивні і реактивні бездротові сенсорні мережі. У проактивній БСМ сенсорні вузли в мережі час від часу перевіряють свою зону відповідальності і передають дані, які важливі для мережі. У реактивних БСМ вузли швидко можуть реагувати на спонтанні та різкі зміни в області сенсорного поля.

- Сенсорні мережі можна класифікувати на такі основні типи, як Гомогенні (однорідні) і Гетерогенні бездротові сенсорні мережі (неоднорідні) в залежності від складників в їх вузлах. В однорідних БСМ всі сенсорні вузли виконують однакові функції з точки зору енергії, батареї і апаратної складності. Гетерогенні ж сенсорні мережі аперують двома, трьома або більше типами вузлів, враховуючи різні енергетичні і функціональні властивості мережі.

- **Однорангові та Ієрархічні мережі.** Бездротові сенсорні мережі можна поділити, враховуючи їх структуру мережі на Однорангові та Ієрархічні: У однорангової мережі всі вузли можуть виконувати однотипні завдання і передача даних на шлюз або прямо до своєї БС. В ієрархічних мережах вузли можуть ділитись на головні вузли і сенсорні вузли. Відповідно, сенсорні вузли збирають дані, а головні роблять обробку цих даних, аналіз та передачу на шлюз або базову станцію (див. Рис. 1.6).

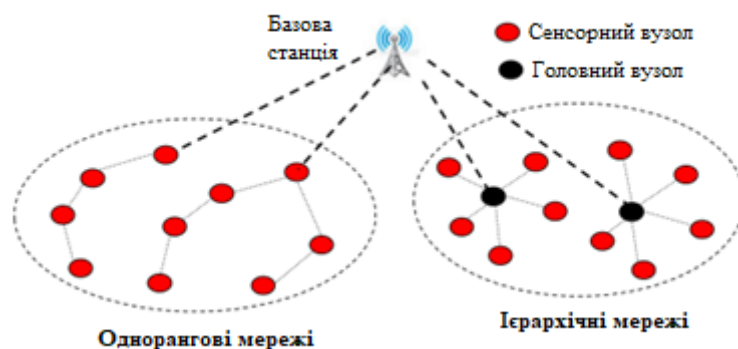


Рис. 1.6 Класифікація БСМ в залежності від структури мережі

- **Випадкове і детерміноване розміщення сенсорних вузлів.** Бездротові сенсорні мережі можна поділити в залежності від їх способу розміщення своїх

сенсорних вузлів в мережі. При випадковому розміщенні сенсорних вузлів в мережі, вони випадковим чином розташовуються по деякій області. Детерміноване розміщення може передбачати розміщення сенсорних вузлів враховуючи попередній визначений план сенсорної мережі. Отже, можна сказати, що алгоритм розподілу даних між сенсорними вузлами мережі в першому і другому випадку можуть бути кардинально різні по своїй суті.

- **Статичність і Мобільність.** Проведши дослідження, ми виявили, що потреба в моніторингу суспільства, тваринного світу і речей в цілому викликає потребу застосування мобільних вузлів в бездротових сенсорних мережах. Сенсорні вузли, які мають практичне використання в БСМ, являються або стаціонарними, або мобільними. Водночас, мобільні сенсорні вузли (МСМ) можуть переміщатися із зони в зону, через це зв'язок між декількома вузлами в сенсорній мережі з МСМ може бути трохи ускладненим, що є одним із недоліків.

- **Двовимірні і тривимірні бездротові сенсорні мережі.** Бездротові сенсорні мережі також можна розділити на такі класи, як двовимірні і тривимірні БСМ, не враховуючи те, що більшість вже існуючих сучасних научних робіт в області БСМ сьогодні присвячені двовимірному простору, у дійсності ці мережі функціонують в тривимірному просторі, передусім з урахуванням появи можливих нових додатків, наприклад, як літаючі сенсорні мережі (ЛСМ). Отже, треба оцінити можливість роботи відомих існуючих протоколів для $2D$ в області бездротових сенсорних мереж, які функціонують у $3D$.

1.4. Маршрутизація в бездротових сенсорних мережах

В БСМ, зазвичай, працюють з використанням протоколу *IEEE 802.15.4* (*Gutierrez et al. 2001*), який створено спеціально для комунікацій на невеликих дистанціях з малою потужністю сенсорних мереж, і підтримується майже усіма академічними і комерційними сенсорними вузлами. Коли радіус передачі даних наших сенсорних вузлів доволі великий, та сенсорні вузли мають можливість передавати дані з вузлів прямо на БС, то вони мають змогу формувати зоряну топологію, як зображено знизу на рисунку 1.7.

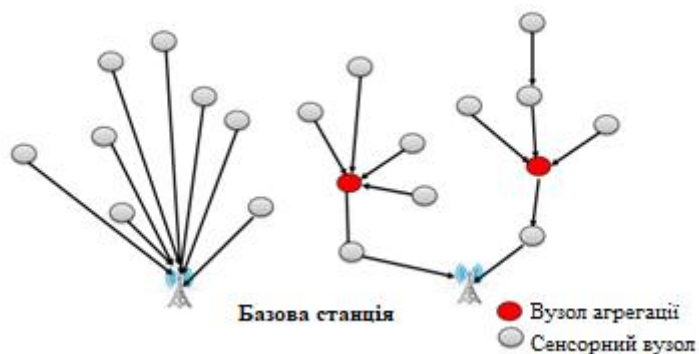


Рис. 1.7 Однокрокова і багатокрокова взаємодія в БСМ

Розбираючи цю топологію, можна сказати, що кожен сенсорний вузол мережі напряду зв'язується з БС, використовуючи єдиний хоп (крок). Отже, ця взаємодія називається однокроковою. Проте, сенсорні мережі дуже часто покривають великі географічні території, і потужність радіопередачі може бути зведена до мінімуму з логічною метою економії енергії для продовження подальшої роботи БСМ; таким чином, багатокрокову взаємодію можна назвати вдалим рішенням для сенсорних мереж (показано зверху на рисунку 1.7). У такій мережевій топології сенсорні вузли повинні передати свої власні дані з мінімальною втратою, а й також виконувати роль передавачів для інших сенсорних вузлів мережі, тобто можна сказати, що вони мають забезпечувати стабільну передачу усіх даних і від інших сенсорних вузлів мережі до БС. Це глобальна проблема маршрутизації, іншими словами, маємо завдання знаходження найкоротшого шляху з невеликою кількістю кроків ретрансляції від сенсорного вузла на БС, є найважливішою проблемою, яка зараз розглядається усіма науковцями світу у сфері БСМ.

Маршрутизація в БСМ являє із себе досить складний процес через властиві сенсорним мережам властивості, які відрізняють їх від інших таких же мереж, як мобільні *Ad Hoc* або стільникові мережі:

- Досить традиційна адресація через *IP*-протоколи не може бути застосована до бездротових сенсорних мереж через порівняно великої кількості сенсорних вузлів. У сенсорних мережах інколи отримати дані більш важливо, чим знати ідентифікатори вузлів, з яких вони надіслані.

- Ресурси сенсорних вузлів в БСМ обмежені, враховуючи можливості якісної обробки інформації, пропускну здатності мережі, обсягу пам'яті, обчислювальних можливостей, отже, необхідне вдале і доцільне управління цими ресурсами.

- Сенсорні вузли, враховуючи їх простоту, як елементів, зазвичай дуже ненадійні.

- Топологія сенсорних мереж періодично змінюється. У деяких додатках зазначено, що сенсорні вузли мають властивість мобільності і змінювання своєї геолокації.

- Деякі вузли в мережі здійснюють однакові завдання, тобто потім трафік даних генерується так, що різні сенсорні вузли передаватимуть одинокову інформацію один одному витрачаючи ресурси мережі.

Якщо врахувати усі вищесказані фактори, то характеристик було створено дуже багато протоколів маршрутизації для застосування в БСМ. Протоколи, які відповідають *Ad-hoc* мережам, не мають змоги ефективно вдосконалюватися в сенсорних мережах, бо вони не використовують тонкі особливості БСМ і потрібні вимоги.

1.5. Проблеми планування і маршрутизації в бездротових сенсорних мережах

З впевненістю можна сказати, що один з векторів розвитку маршрутизації в бездротових сенсорних мережах полягає в тому, щоб здійснити повну передачу даних з мінімальними втратами, продовжити при цьому життєдіяльність сенсорної мережі і максимально запобігти потенційні збої в роботі. Утворення протоколів маршрутизації в БСМ залежить від декількох обмежуючих нюансів. Ці нюанси мають враховуватись, перед тим, як ефективний зв'язок буде гарантований в БСМ.

Передовою позицією є наявність вміння адаптуватися до змін в відмовостійкості, зв'язності та масштабованості.

Тому при розробці алгоритмів маршрутизації та плануванні бездротових сенсорних мереж мають бути зауважені такі фактори:

- **Споживання енергії (Енергетична ефективність).** Найбільш пригожий алгоритмом має за мету - гарантію передачі інформації в потрібний момент і з мінімальними витратами ресурсів. У багатокрокової БСМ кожен вузол грає подвійну роль: датчик та маршрутизатори. Вихід з ладу деяких датчиків через відключення електроенергії може призвести до змін в топології, а також вимагати повторної маршрутизації пакетів і реорганізації мережі. Енергетична ефективність - одна з найважливіших задач у створенні бездротових сенсорних мереж.

- **Модель передачі даних.** Збір і передача даних БСМ залежить від застосунку та релевантності даних. Моделі передачі даних можна класифікувати як безперервні, керовані подіями та інтегровані. Безперервна модель передачі даних підходить для застосунків, які потребують цілодобового спостереження. У режимі подій і в гібридному режимі датчики реагують на подію або додаток і створюють повідомлення в датчик-лідер кластеру або БС. Алгоритм вибору датчика-лідера і протоколу шляху часто залежить від методу передачі даних, безпосередньо пов'язаного з енергоспоживанням і стабільністю шляху.

- **Гетерогенні вузли.** В залежності від мети використання датчик може виконувати різну функцію в схемі або мати різноманітні параметри. Існування різнорідних датчиків викликає появу різних технічних неполадок, пов'язаних з маршрутизацією даних.

- **Толерантність до відмов або надійність.** Деякі датчикам властиво несправно працювати або бути заблокованими через недостатню потужність, критичні умови навколишнього середовища або наявність перешкод. Збій окремих датчиків не повинен впливати на цілісну роботу сенсорної мережі. БСМ має підтримувати заданий рівень якості, як в аспекті обслуговування, так і в надійності.. Далі в роботі буде запропонований новий відмовостійкий алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж.

- **Масштабованість.** Залежно від поставленої задачі число сенсорних вузлів в бездротових сенсорних мережах, розташованих в сенсорному полі, може коливатися від сотен, тисяч і т.д. Щільність сенсорних вузлів можна визначити за формулою:

$$n_{\mu}(R) = (N\pi R^2)/A$$

де: N – число вузлів, R – радіус зв'язності сенсорного вузла.

- **Гнучкість.** Алгоритми сенсорних мереж повинні мати можливість адаптуватися до різного ПО БСМ. При розробці алгоритмів треба враховувати те, що можливості сенсорного вузла можуть змінюватися, а також враховувати умови роботи.

- **Зв'язність.** Підтримці необхідного значення зв'язності може сприяти висока щільність вузлів. Але зв'язність через втручання, перешкод або шумів може мінімізуватись.

- **Покриття.** У БСМ всі датчики охоплюють конкретну зону довкілля. Елемент покриття простору також є вирішальною характеристикою БСМ, особливо для систем моніторингу.

- **Мобільність.** Переважна частина застосунків вважають, що датчики нерухомі. Однак активність датчиків може знадобитися для різноманітних застосунків, таких як літаючі нейронні мережі. Передача даних з мобільних мереж дуже складна, так як стабільність маршруту стає важливою проблемою у доповненні до енергії, пропускної спроможності.

- **Двовимірний і тривимірний простір.** Сенсорні мережі часто можуть бути розгорнуті в тривимірному просторі, наприклад, в хмарочосах, моніторингу дикої природи, підводний моніторинг, космічних сенсорних мережах, тощо. Перехід від двовимірного простору до тривимірного створює багато нових проблем через іншу топологію.

- **Агрегація даних.** Датчики можуть виробляти велику кількість зайвих даних, включаючи повторювані повідомлення про події з кількох датчиків. Авжеж, такі дані можна об'єднати, щоб зменшити кількість повідомлень. Інтеграція даних є звичайним процесом, який включає багато застосунків БСМ, насамперед в ієрархічних протоколах топології для БСМ. Вищезгаданий спосіб користується успіхом для подовження життєвого циклу мережі.

- **Самоорганізація.** Сенсорні мережі потребують володіти функціями до самоорганізації. Тому, обчислювальні можливості, можливості гарантування зв'язку,

можливості керування повинні забезпечувати і можливість самостійного функціонування БСМ у будь-якому інтервалі часу.

- **Точність і латентність.** Надання актуальних даних у даний момент - найважливіша задача застосунків БСМ. Дані мають бути надіслані через бездротову сенсорну мережу точно і вчасно. Еталонний алгоритм має гарантувати якісну передачу даних з витратами енергії близькими до нуля.

1.6. Гомогенні і гетерогенні БСМ

Сенсорні мережі можуть бути розділені на два основних типи: гомогенні (однорідні) і гетерогенні (неоднорідні) сенсорні мережі [31].

- **Гомогенні.** В однорідних бездротових сенсорних мережах кожен датчик аналогічний іншому з точки зору енергоефективності та функціонування.

- **Гетерогенні.** Сенсорні мережі можуть складатися з типів датчиків більше двох, відповідно з різними енергетичними і функціональними умовами.

1.6.1 Типи гетерогенних ресурсів

Є три найпоширеніші види неоднорідності ресурсів в сенсорних вузлах: обчислювальна неоднорідність, неоднорідність мережевих можливостей і неоднорідність енергії.

Обчислювальна неоднорідність означає, що гетерогенний вузол має перевагу над типовим датчиком мережі за рахунок більшого значення потужності і більшого об'єму пам'яті. При використанні більш потужних обчислювальних ресурсів датчики мають змогу гарантувати комплексну обробку даних і їх зберігання на довгий строк.

Неоднорідність мережевих можливостей означає, що гетерогенний вузол має перевагу над типовим датчиком мережі за рахунок більшої пропускної здатності і більш потужного радіо передавача, ніж рядовий датчик. Такі гетерогенні датчики забезпечують більш надійну передачу даних, ніж типові.

Неоднорідність енергії означає, що гетерогенний сенсорний вузол має можливість змінювати акумулятор під час функціонування датчику чи можливість під'єднання до постійного живлення.

1.6.2 Вплив неоднорідності сенсорних вузлів на БСМ

Розміщення кількох різних датчиків в сенсорній мережі може привести до наступного:

Зменшення затримки передачі даних: Обчислювальна неоднорідність може збільшити швидкість обробки даних для сусідніх датчиків, а неоднорідність мережеских можливостей – привести значення очікування для передачі інформації до мінімально можливого.

Збільшення тривалості життєвого циклу мережі: Значення витрачених енергетичних ресурсів, в гетерогенних мережах, під час передачі буде змінено до мінімального, навідміну від однорідних.

Підвищення надійності передачі даних: Використання в гетерогенній БСМ сенсорних вузлів з високою пропускнуою здатністю і більш потужними радіопередавачами може підвищити надійність передачі даних.

На рисунку 1.8 показана гетерогенна модель для бездротової сенсорної мережі.

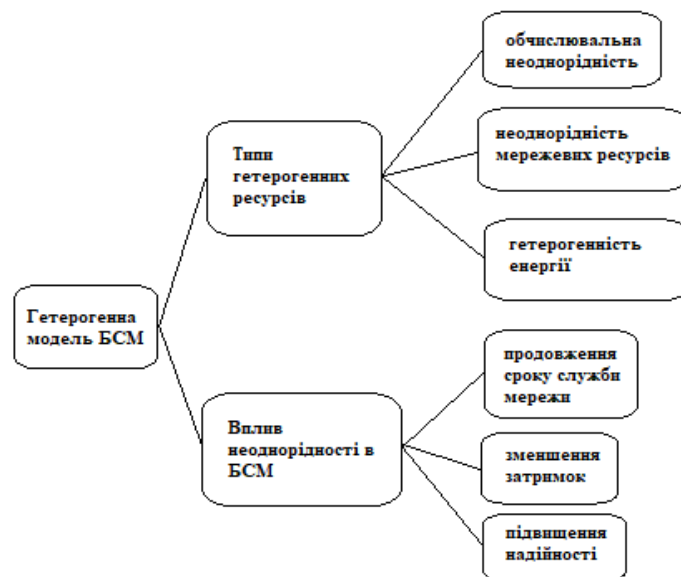


Рис. 1.8 Гетерогенна модель БСМ

1.7 Кластеризація БСМ

Сьогодні ієрархічні протоколи маршрутизації важко уявити без кластеризації. Внаслідок досліджень по кластеризації БСМ було розроблено кілька механізмів кластеризації, таких як *LEACH*, *PEGASIS*, *TEEN* і *APTEEN*. В основному, ці механізми кластеризації базуються на виборі датчика-лідера кластера. Тому,

основним для кластерних БСМ є задача по створенню алгоритмів вибору датчиків-лідерів кластера. Приклад кластерної БСМ показаний на рисунку 1.9.

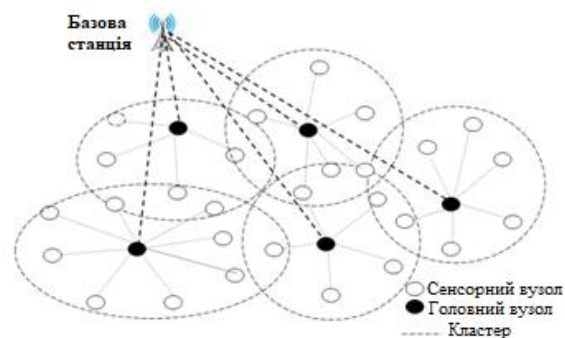


Рис. 1.9 Кластерна БСМ

Протоколи маршрутизації на основі кластеризації складаються з двох фаз, які в свою чергу діляться на два етапи: вибір датчика-лідера кластера *CH* (*Cluster Head*), формування кластера, агрегування даних і передача даних (див. рис. 1.10).



Рис. 1.10 Блок-схема протоколів маршрутизації на основі кластеризації (процес кластеризації)

Сенсорні вузли відповідно до виконуваних ними функціями в алгоритмах кластеризації можуть бути згруповані в наступні чотири категорії:

- **Головний вузол кластера (CH):** Регуляція групи датчиків, розташованих в межах кластера, компіляція даних від учасників кластера і транспортування зібраних або агрегованих даних на наступний датчик є основними функціями *CH*.

- **Базова станція (BS):** Звертаючи увагу на здатність обробки даних і необмежене джерело енергії, БС може бути регулятором мережі і / або прийомним

датчиком, де всі агреговані дані обробляються відповідно до застосунка БСМ і вимогами кінцевого користувача.

- **Релейний вузол *RN (Relay node)***: Транзитні вузли в багатокрокових мережах, виконують функції передачі зібраних або агрегованих даних іншими вузлами, до місця призначення.

- **Типовий вузол *GN (General node)***: Більшість вузлів в мережі, задача яких збір інформації.

Рис. 1.11 демонструє два способи кластеризації. В першому з них (Рис. 1.11а) всі датчики-лідери кластера транспортують дані напряму на базову станцію. Для другого варіанту кластеризації утворюється багатокрокова мережа, яка передбачає, що від деяких датчиків-лідерів надсилання даних на базову станцію здійснюється транзитом через інші датчики-лідери (на рис.11б не показані).

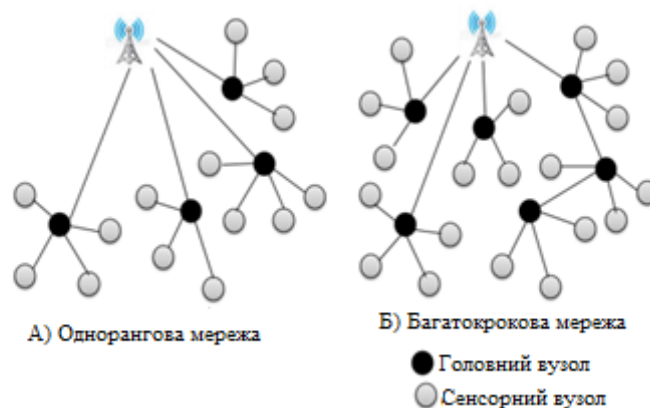


Рис. 1.11 Кластеризація з одноранговою мережею головних вузлів (а) і кластеризація з багатокроковою мережею головних вузлів (б).

1.7.1 Задачі роботи

Проведений вище аналіз дає змогу зосередитися на завданнях, пов'язаних з кластеризацією БСМ. Кластеризація є фундаментальним способом формування БСМ. Робота кластеризованої БСМ багато в чому залежить від алгоритму вибору датчика-лідера, найважливіших в яких є вимоги по забезпеченню більшого покриття і більшої тривалості життя мережі. Необхідно відмітити, що в кластерних БСМ алгоритм вибору датчика-лідера є аналогічним з протоколом маршрутизації повідомлень. Сформулюємо вимоги до алгоритму вибору датчика-лідера таким чином:

1. Алгоритм повинен мати змогу підлаштовуватись під різні розміри мережі і виконувати це ефективно.

2. Обчислення мають бути простими, щоб не мати негативного впливу на срок функціонування мережі.

3. Алгоритм повинен мати змогу не залежати від технічних здібностей датчиків.

4. Алгоритм мусить примусово обмежити число передач повідомлень для збільшення строку функціонування мережі.

Поки що створено велику кількість алгоритмів вибору датчика-лідера, переважно БСМ з нерухомими датчиками. Але, має місце бути й ряду питань, пов'язаних з розробкою ефективних алгоритмів для мобільних мереж. Так як, використання кластеризації у БСМ сьогодні займає передові позиції, важливо також покращити системне розташування датчиків, які забезпечують необхідне охоплення простору. Дана дисертація спрямована саме для розв'язання даних питань.

Таким чином, мета роботи полягає в розробці нових алгоритмів вибору датчика-лідера в БСМ для мереж з мобільними вузлами, відмовами і розробці методики розміщення сенсорних вузлів, що забезпечує необхідне покриття простору.

Для досягнення поставленої мети в роботі послідовно вирішуються наступні задачі:

- аналіз актуальних позицій в області досліджень БСМ, визначення передових характеристик і складу бездротових сенсорних мереж;
- аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації, самоорганізації і вибору датчика-лідера кластера в бездротових сенсорних мережах;
- оцінка та порівняльний аналіз алгоритмів прямої передачі *DT* і кластеризації *LEACH*, *SEP*, *TEEN*, *DEEC* в гомогенній, дворівневій і багаторівневій гетерогенній сенсорних мережах;
- розробка нового адаптивного алгоритму кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними датчиками на основі комбінованого критерію прогнозування і значення придатності сенсорного вузла;
- розробка нового відмовостійкого алгоритму кластеризації для бездротових сенсорних мереж (*FT-TEEN*);

- дослідження значень зв'язності покриття, і щільності в плоских (2D) і об'ємних (3D) бездротових сенсорних мережах з метою розробки методики розташування датчиків, що гарантують 90% покриття для 2D і 3D БСМ;

- оцінка тривалості життєвого циклу мережі, періоду стабільності і пропускної здатності БСМ на основі відносини між радіусом покриття (R_S) і радіусом дальності зв'язку (R_C).

Висновки

1. Саморегулюючий характер, особливі умови з енергетичної ефективності, толерантність до відмов і масштабне значення числа вузлів в БСМ вимагають розробки специфічних алгоритмів маршрутизації для бездротових сенсорних мереж.

2. Архітектура сенсорної мережі може бути представлена як однорівнева або як ієрархічна. При ієрархічній архітектурі побудови БСМ найбільшого поширення набув метод кластеризації мережі.

3. Поки що розроблено велику кількість алгоритмів вибору датчика-лідера, переважно для БСМ з нерухомими датчиками. У той же час, перелік задач, пов'язаних з розробкою ефективних алгоритмів вибору датчика-лідера для мобільних мереж, стійких до відмов алгоритмів, ще потребують вирішення. Оскільки кластеризація використовується для БСМ з дуже високою щільністю, важливо також розробити техніку розташування датчиків, які гарантують потрібне покриття простору.

4. За результатами проведеного аналітичного дослідження сформульовані мета і завдання роботи.

РОЗДІЛ 2.

ОЦІНКА І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ГОМОГЕННИХ І ГЕТЕРОГЕННИХ БЕЗДРОВОТИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

2.1. Огляд досліджень бездротових сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі представляють з себе мережі, що самоорганізуються і складаються з великої кількості недорогих, енергоефективних і багатофункціональних бездротових вузлів, що включають сенсори і можливості

радіозв'язку та обчислень. Датчики підключаються на коротких відстаннях через бездротове середовище і виконують загальну функцію - збирають дані про спостережувані події з довкілля та передають дані БС для обробки та аналізу. Прикладами зібраної інформації можуть бути екологічні дані, військовий захист та управління продуктами.

Датчики БСМ зазвичай працюють в ситуаціях, коли відсутня електроенергія або навіть заміни батареї датчика. Тому фундаментальним аспектом БСМ є залишкова енергія [53, 54]. На сьогоднішній день енергетичні перешкоди в БСМ вважаються найбільш ефективними з точки зору скорочення життєдіяльності мережі [5, 28, 27].

Останнім часом в дослідженнях з'явилася ще одна група алгоритмів маршрутизації для БСМ - спеціалізовані алгоритми для n -мірного простору [24, 1, 15], але в цьому розділі ці алгоритми не розглядаються. Також в розділі не розглядаються спеціалізовані алгоритми для мобільних сенсорних мереж [22, 21, 20], тобто вважається, що датчики знаходяться у певній координаті простору.

У розділі проводиться оцінка та порівняльний аналіз передових при побудові БСМ алгоритмів маршрутизації та самоорганізації для бездротових сенсорних мереж із нерухомими вузлами на площині. Порівняння алгоритмів здійснюється за результатами моделювання в *MATLAB*.

Значеннями для порівняння є період стабільності під час роботи сенсорної мережі, залишкова енергія, час до загибелі першого і останнього датчику. Реалізовано аналіз алгоритму прямої передачі *DT* і найбільш відомих алгоритмів кластеризації *LEACH* (*Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy*), *SEP* (*Stable Election Protocol*), *DEEC* (*Distributed Energy Efficient Clustering*) і *TEEN* (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol*). Порівняння алгоритмів проводиться для гомогенної, дворівневої і багаторівневої гетерогенних сенсорних мереж.

2.2. Класифікація алгоритмів маршрутизації в БСМ

Велика кількість вчених висували припущення по різних рішеннях по алгоритмам маршрутизації для БСМ враховуючи необхідних нюанси, зазначених раніше у роботі. Наступні розглядатимуться алгоритми маршрутизації, які знайшли використання в БСМ, в залежності від безлічі параметрів і критеріїв.

Алгоритм маршрутизації вважається адаптивним, якщо деякі величини системи можна контролювати для того, щоб адаптуватися до поточних умов мережі і доступним енергетичним рівням. Крім того, ці алгоритми можуть бути класифіковані на основі мережевої структури, вибору маршруту і процесу управління і т.д., як було показано на рисунку 1.2. Алгоритми маршрутизації можуть бути класифіковані відповідно до мережевої структури як ієрархічні *LEACH* (Heinzelman, 2002), неієрархічні *SPIN* (Heinzelman, 1999) і засновані на місцезнаходженні.

В залежності від вибору маршруту алгоритми маршрутизації можуть бути чотирьох типів: перший тип - багатопроменеві алгоритми (*Multipath-based protocols*), другий тип - алгоритми маршрутизації на основі теорії черг (*Query-based routing protocols*) *COUGAR* (Yao, 2002), третій - алгоритми на основі розташування (*negotiation-based protocols*) *GFG* (Intanagonwiwat, 2000), четвертий - алгоритми на основі якості обслуговування (*QoS-based routing protocols*) *SAR* (Sohrabi, 2000). У доповненні до вищесказаного, алгоритми маршрутизації на основі процесів управління діляться на три групи: гібридні реактивні та активні.



Рис. 2.1 Категорії протоколів маршрутизації в БСМ

2.2.1. Алгоритми маршрутизації на основі мережевої структури

Конструкцію сенсорних мереж можна розділити на однокрокові мережі (*One-hop networks*) в сенсорних полях найчастіше маленького розміру і ієрархічні багатокрокові мережі (*Multi-hop networks*). Далі розглянемо більш докладно алгоритми маршрутизації і самоорганізації в БСМ, які можуть бути класифіковані відповідно до мережевою структурою.

- **Алгоритми на основі розташування (*location based*)**

Відомий факт, що маршрутизація використовує численну інформацію про точне місцезнаходження вузла мережі. Сенсорні вузли мережі, зазвичай, розподілені непередбаченим чином на сенсорному полі, та геолокація цих сенсорів вираховується використовуючи систему глобального позиціонування (*GPS*, *ГЛОНАСС*) або використовуючи інші методи, такі як, системи локального позиціонування на базі *WiFi*. Важливо, що передача інформації про географічне положення може вносити своєю роботою додаткові витрати, тим паче, коли місцезнаходження вузлів змінюється час від часу, що притаманно для *MCM*. Найвідоміші із сучасних алгоритмів, які належать до цієї категорії, є:

- Географічна і енергетична маршрутизація *GEAR* (*Geographic and Energy Aware Routing*).
- Географічна маршрутизація по відстані *GEDIR* (*Geographic Distance Routing*).

- **Неієрархічні алгоритми. Прикладами неієрархічних алгоритмів маршрутизації можуть бути наступні:**

- **Алгоритм прямої передачі (*Direct Transmission*).**

Direct Transmission представляє з себе неієрархічний алгоритм маршрутизації, який для однокрокових сенсорних мереж, де майже кожен сенсорний вузол передає інформацію напряму до шлюзу або БС, невраховуючи відстань, і всі сенсорні вузли мають майже спільну основну функціональність. [38]. На рисунку 2.2. можемо бачити неієрархічний алгоритм прямої передачі *DT*.

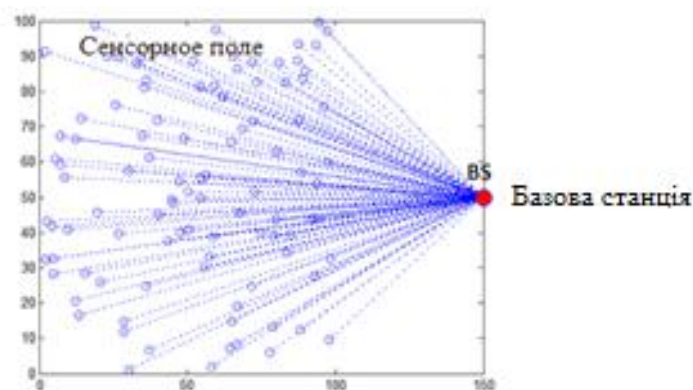


Рис. 2.2 Алгоритм прямої передачі в БСМ

- **Алгоритм Наводнення**

Про алгоритм наводнення можна сказати, що це багатокроковий неієрархічний алгоритм маршрутизації, для якого кожен вузол сенсорної мережі, отримуючи пакет даних від сусіднього вузла, передає його іншим сусіднім вузлам. Цей процес триває, поки пакет не приходить на БС або шлюз, або не досягає максимально можливої кількості обмінів даними. Цей алгоритм просто реалізується, проте він має деякі особливості, які включають можливість дублювання повідомлень, переданих одному і тому ж сенсорному вузлу, і, як висновок, дуже затратне енергоспоживання. Алгоритм показаний на рисунку 2.3.

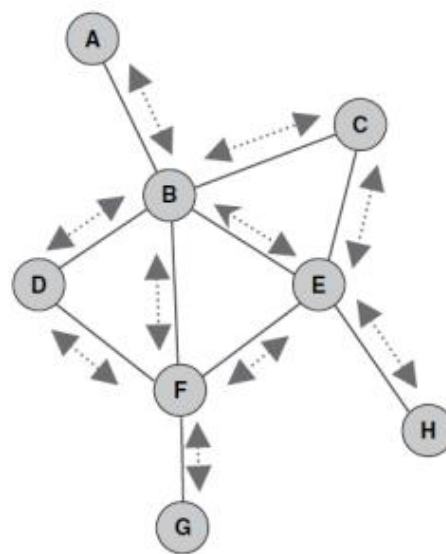


Рис. 2.3 Алгоритм наводнення в БСМ

- Алгоритм поширення чуток

Алгоритм поширення чуток є вдосконаленою версією алгоритму наповнення. У цьому алгоритмі замість того, щоб надсилати кожен пакет всім сусідам, пакет випадковим чином вибирається з таблиці сусідів і відправляється одному сусіду. Алгоритм поширення чуток усуває проблему повторюваних повідомлень, але також збільшує затримку передачі повідомлень, що є основною проблемою для непослідовних алгоритмів.

- Ієрархічні протоколи маршрутизації для БСМ

В ієрархічних алгоритмах вузли мають властивість перетворюватися на концентрації, а усі вузли в кожен групу. Типи ключів збирають дані від вузлів - членів групи, організовують і передають дані на шлюз або базову станцію. Такий збір даних про життєво важливі заложи значно знижує споживання електроенергії в мережі і збільшує тривалість життя. Важливим фактором при розробці алгоритмів

високопродуктивних бездротових сенсорних мереж, можна сказати, що є вибір головного вузла. Є два способи вибрати головний вузол кластера: вибрати випадковий головний вузол або вибрати попередньо визначений головний вузол. Розглянемо наступні алгоритми непрямого виділення головних вузлів. Непрямий підбір головних вузлів призводить до створення груп різного розміру. Завдяки ієрархічним і самоорганізуючим алгоритмам кожен член кластеру має можливість повернутися до головного вузла, призначити таблиці членам кластера головного вузла тощо.

- **Алгоритм адаптивної кластеризації *LEACH***

Ієрархічний протокол LEACH (Low Energy Adaptive Association) [40] є одним із перших ієрархічних протоколів і забезпечує баланс споживання енергії. Життєвий цикл мережі складається з етапу формування групи та швидкості передачі даних.

Формування кластеру (*Set-up phase*).

Під час формування кластеру, кожна сенсорна комірка генерує випадкове число від 0 до 1. Кожен датчик має обмеження на кількість попередньо визначених вузлів у мережі. Якщо випадкове число в з'єднанні занадто мале, клітини можуть бути ключем до поточного етапу життя BSM, інакше залоза залишається членом групи. Розрахунок кордонів є ключовим завданням у реалізації алгоритму LEACH.

$$Th(LEACH) = \begin{cases} \frac{p}{1-p*(r*mod\frac{1}{p})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

В (2.1) P - зумовлений відсоток датчиків-лідерів серед усіх сенсорних вузлів. Оптимальне значення P оцінюється в 5% від загального числа сенсорних вузлів.

Змінна r відповідає поточному інтервалу функціонування сенсорної мережі, G позначає кількість датчиків, які не отримали роль датчиків-лідерів за останні $1 / P$ інтервалів. Окрім, при виборі датчика-лідера інші датчики самостійно обирають, до якого кластеру вони будуть належати на основі потужності одержуваного сигналу *RSS (Received Signal Strength)* від датчика-лідера.

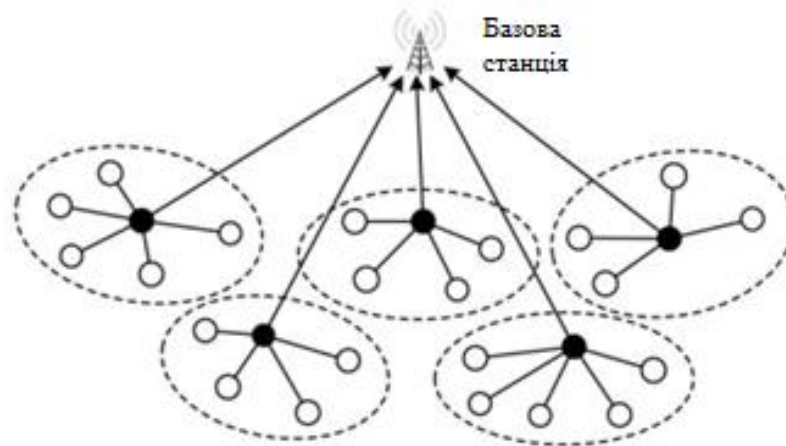


Рис. 2.4 Топологія LEACH

Коли всі датчики стали одним цілим кластером, датчик-лідер, на основі методу *TDMA*, створює графік, що гарантує відсутність колізій при передачі повідомлень.

Передача даних (*Steady-state phase*).

Датчик-лідер публікує розклад передачі та запитує учасників кластера про передачу повідомлень. Датчики виконують пересилку даних у конкретний момент часу TDMA. Після отримання повідомлень від усіх учасників датчик-лідер створює власні повідомлення та надсилає їх на шлюз або базову станцію.

Час від часу датчики-лідери обираються по новому, робиться це для розподілу енергетичного навантаження по мережі і кожен датчик має шанс отримати роль датчика-лідера.

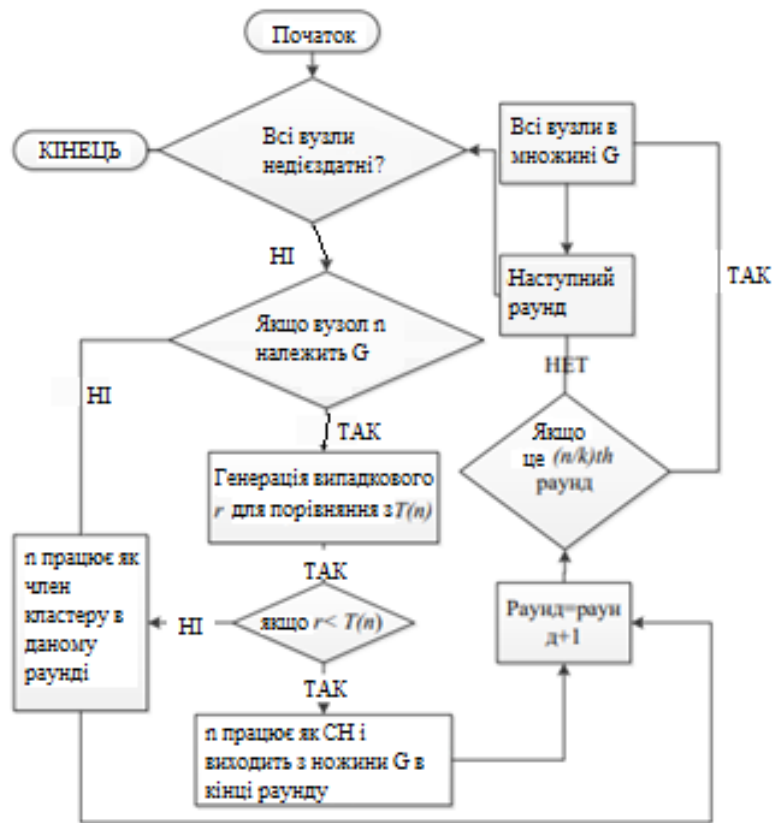


Рис. 2.5 Блок-схема *LEACH* протокола

Алгоритм *LEACH* не потребує фундаментальних даних про мережу та представляє з себе - розподілений підхід до кластеризації мережі. Згодом алгоритм *LEACH* був неодноразово модифікований і з'явилися такі алгоритми, як *TL-LEACH* [25], *E-LEACH* [35], *M-LEACH* [34], *LEACH-C* [42], *V-LEACH* [43], *LEACH-FL* [40], *W-LEACH* [16], *T-LEACH* [37] і т.д.

Переваги алгоритму *LEACH* полягають у наступному [38]:

1) Будь-який датчик, який був датчиком-лідером *CH* в даному інтервалі, не може бути обраним знову як, тому навантаження в мережі ділиться майже однаково між всіма датчиками;

2) Використовуваний метод *TDMA* і розклад передачі дозволяють уникнути непотрібних колізій *CH*;

3) Учасники кластеру можуть переводяться в режим очікування, для економії витрати ресурсів.

Проте, існують і кілька недоліків в алгоритмі *LEACH*:

1) Згаданий алгоритм реалізує лише пряму передачу повідомлень всередині кластера і безпосередньо з датчика-лідера в напрямку до БС. Перепоною в

представленій ситуації може виступати велика розмірність мережі, а також на великих відстаннях витрачається велика кількість ресурсів;

2) Навіть при гарантованій, регулярній зміні датчиків-лідерів, LEACH на практиці не дає реального балансу на датчиках з різною величиною значення енергії на старті роботи, адже СН датчики обираються в термінах ймовірностей без урахування рівня енергії;

3) При перевиборі СН є складність в тому, що всі датчики зможуть бути датчиками-лідерами, адже перевибори реалізуються в термінах ймовірностей. Тому деякі датчики, які знаходяться далі від епіцентру подій, можуть залишитись не обраними на роль датчика-лідера;

4) Ідея динамічної кластеризації, тобто вибір головних вузлів в кожному раунді, приносить додаткове навантаження.

- *TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols)*

TEEN [27] алгоритм базується на методі кластеризації *LEACH*. Кожен датчик в кластері в певному періоді стає датчиком-лідером. Мережа з використанням алгоритму *TEEN* також має ієрархічну структуру на основі кластерної організації. Головний вузол може призначати своїм вузлам «жорсткий» (*hard*) і «м'який» (*soft*) пороги:

- Жорсткий поріг (*Hard Threshold*): вузол посилає інформацію головному вузлу тільки, якщо кількість накопичених даних знаходиться в заданих межах;

- М'який поріг (*Soft Threshold*): вузол посилає інформацію головному вузлу тільки, коли кількість накопичених даних змінилося як мінімум на величину, рівну або більшу, ніж м'який поріг.

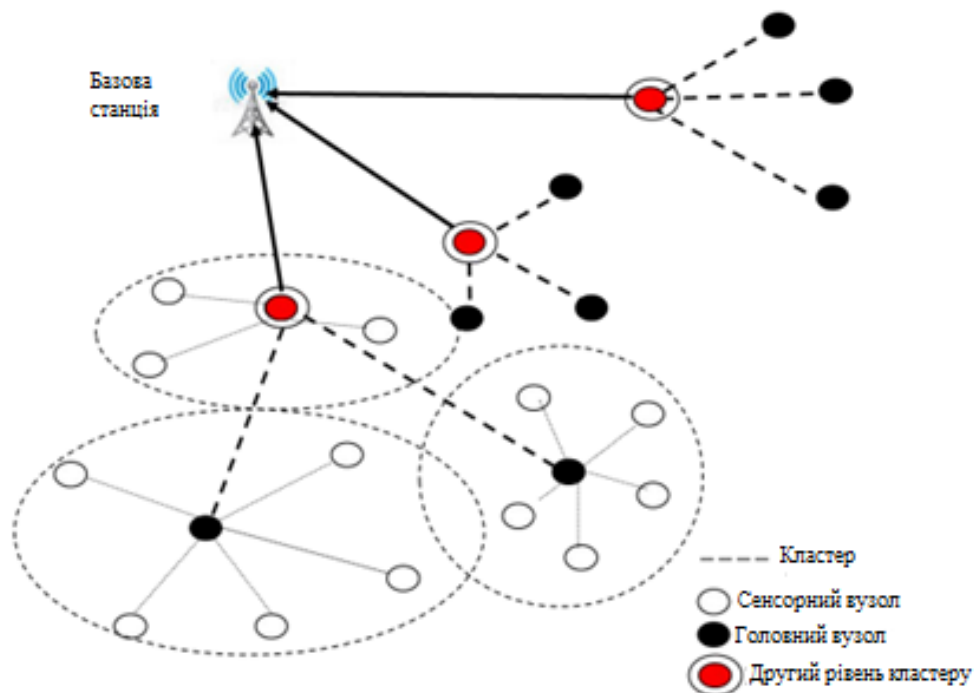


Рис. 2.6 Основна топологія алгоритму *TEEN*

Відповідно до сказаного вище, алгоритм *TEEN* має в арсеналі наступні прерогативи:

1) Жорсткий поріг (*HT*) зменшує число повідомлень, передаючи інформацію тільки тоді, коли зібрані дані знаходяться в діапазоні інтересу. Крім того, м'який поріг зменшує кількість повідомлень винятком тих, у яких є мінімальна зміна в зібраних даних. Таким чином, алгоритм *TEEN* зменшує споживання енергії і покращує ефективність і корисність БСМ в цілому;

2) *TEEN* швидко дає реакцію на масштабні пертурбації в даних, що збираються, що влаштовує реактивні сценарії і передові застосунки.

Але існує кілька недоліків і в алгоритмі *TEEN*:

1) Алгоритм *TEEN* не рекомендований для застосунків БСМ з регулярним збором даних, адже користувач не може дістати жодної інформації, якщо значення параметрів не перевищують порога;

2) Існують витрачені даремно тайм-слоти і ймовірність того, що БС може бути не в змозі відрізнити загиблі вузли від живих, тому що передача може здійснюватися тільки тоді, коли дані перевершують жорсткий поріг або поточне

значення для м'якого порога відрізняється на величину, рівну або більшу, ніж сам м'який поріг;

3) Якщо датчики-лідери *CH* розміщені на відстані, яка більше ніж радіус їх зв'язку, то дані можуть бути втрачені, тому що датчики-лідери виступають єдиними передавачами інформації

- *SEP (Stable Election Protocol)*

Алгоритм SEP [44] був створений для вибору датчика лідера в БСМ на основі теорії, що мережа може мати два типи датчиків з точки зору їх енергії: звичайні та просунуті вузли. Це дає змогу нам впевнено стверджувати, що мережа при таких вихідних даних називається гетерогенною. Енергія просунутих вузлів більше, ніж енергія звичайних. Тому для останніх значення енергії на початку роботи складає: E_0 , в той час як для просунутих $E_0 (1 + \alpha)$.

Зробимо припущення, що наша мережа у своєму складі містить n датчиків, а відсоток просунутих вузлів дорівнює m . Тоді:

$$n * (1 - m) * E_0 + n * m * E_0 * (1 + \alpha) = n * E_0 * (1 + \alpha + m) \quad (2.2)$$

- *DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering)*

Авторами [36] було запропоновано новий розподілений енергозберігаючий алгоритм кластеризації для гетерогенних бездротових багаторівневих сенсорних мереж, який назвали *DEEC*.

DEEC оцінює ймовірність вибору датчика-лідера в багаторівневих гетерогенних БСМ у відповідності з наступною формулою:

$$p_i = p_{opt} \left[1 - \frac{E(r) - E_i(r)}{E_r} \right] = p_{opt} \frac{E_i(r)}{E(r)} \quad (2.3)$$

При цьому в алгоритмі *DEEC* середня енергія мережі $E(r)$ для довільного раунду r розраховується як:

$$E(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \quad (2.4)$$

R означає величину числа раундів існування мережі і виражається такою формулою:

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (2.5)$$

де E_{total} є сумарною енергією в мережі, а E_{round} – це витрата енергії протягом раунду.

2.3. Порівняльний аналіз алгоритмів *DT*, *LEACH*, *SEP*, *DEEC*, *TEEN*

При порівняльному аналізі алгоритмів маршрутизації та самоорганізації для гомогенних і гетерогенних БСМ використовувалися наступні показники:

- **Життєвий цикл.** Оцінка життєвого циклу БСМ дається при участі таких параметрів:

- тривалість інтервалу часу від старту роботи БСМ до події поломки першого датчика,

- тривалість інтервалу часу до моменту часу, коли діючим залишається заданий відсоток сенсорних вузлів,

- тривалість інтервалу часу до поломки фінального датчика.

- **Стабільність.** Тривалість інтервалу часу від старту роботи БСМ до події поломки першого датчика.

- **Нестабільність.** Тривалість інтервалу часу від моменту виходу з ладу першого сенсорного вузла до моменту часу виходу з ладу останнього.

- **Число функціонуючих вузлів і число вийшовших з ладу вузлів.**

Алгоритмів маршрутизації та самоорганізації маршрутизації *DT*, *LEACH*, *SEP*, *DEEC* і *TEEN* порівнювались за допомогою вживання застосунку *MATLAB* і узагальнених параметрів сенсорних мереж, при яких, прийнято, реалізовувати моделювання (таблиця 2.1 і таблиця 2.2). У таблиці 2.2 наведені значення констант для алгоритму *TEEN*. Радіо модель відповідає моделі Кся-Бертоні [41].

Параметри моделювання

Позначення	Значення	Розмірність
N	100	Шт
P	5	%
Розміри поля (X, Y)	(100, 100)	М
Розположення базової станції (x, y)	(100, 150)	М
E_s	0,5	Дж
E_{elec}	70	нДж
Постійне підсилення ϵ_{fs}	10	пДж/бит/м ²
Мультимережева стала ϵ_{mp}	0,0013	пДж/бит/м ⁴
Розмір пакету	4096	Бит
Енергія збору даних одного біта E_{DA}	5	нДж
Втрати на ділянках (експоненціальні)	87	М

Таблиця 2.2

Початкові значення при моделюванні для алгоритму *TEEN*

Позачення	Значення
Жорсткий поріг (<i>Hard Threshold</i>)	100
М'який поріг (<i>Soft Threshold</i>)	2

При порівняльному аналізі використовувалося кілька сценаріїв побудови БСМ.

2.3.1 Перший сценарій

У першому варіанті розвитку подій датчики у довільному порядку розподілені на полі з параметром довжини – 100 метрів і параметром ширини – 100 метрів. Число

вузлів в мережі становить 100 і базова станція знаходиться на кордоні сенсорного поля з координатами (150, 50) м (див. Рис. 2.7).

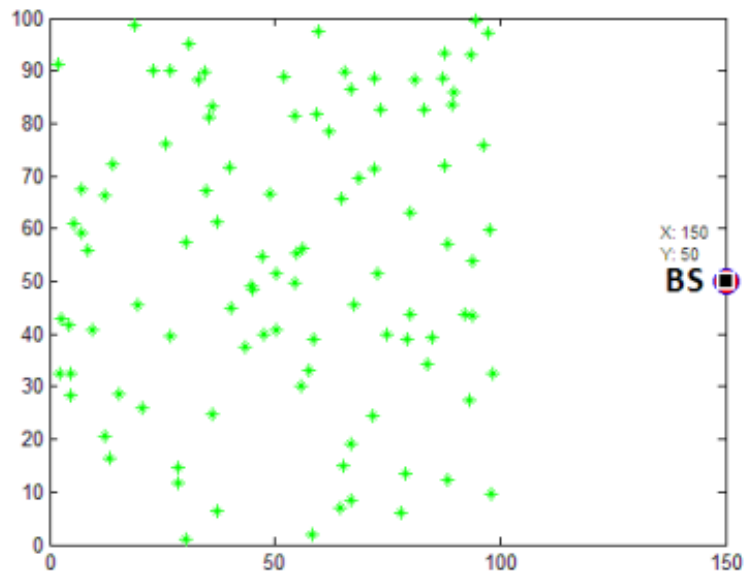


Рис. 2.7 Випадкове розміщення вузлів

В даному, запропонованому випадку прийнято рішення виконати зіставлення алгоритму прямої передачі (*DT*) та алгоритми ієрархічної маршрутизації *LEACH* і *TEEN* для гомогенних (однорідних) сенсорних мереж. На рисунках 2.8 і 2.9 приведені характеристики для алгоритму прямої передачі на початку життєвого циклу і після 180 раундів.

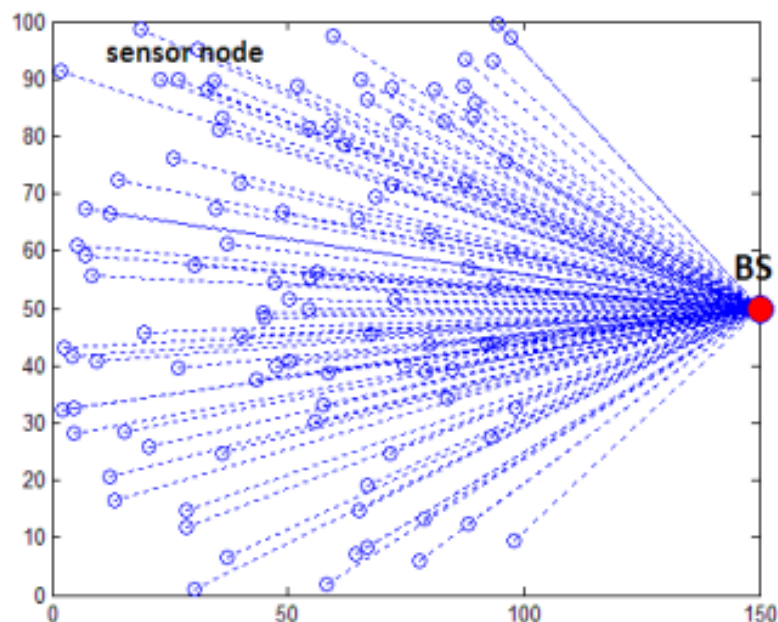


Рис. 2.8 Пряма передача. Початковий стан

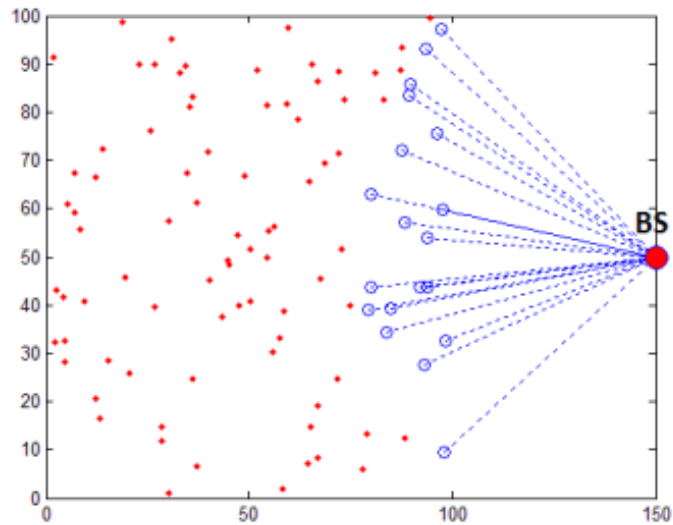


Рис. 2.9 Стан після 180 раундів

При використанні алгоритму прямої передачі *DT* датчик виконує надсилання повідомлень напряму на базову станцію при цьому, дистанція між ними не є важливим аспектом. Як результат, при цьому датчики, які знаходяться на значній відстані від базової станції, перестають функціонувати першими. Тому справедливим буде твердження, яке звучить так: використання алгоритму *DT* має місце лише для невеликих мереж, які менше заданих параметрів (100*100 м).

На рисунку 2.10 показано об'єднання датчиків в кластери у випадку функціонування алгоритмів маршрутизації *LEACH* і *TEEN*, а Рис. 2.11 ілюструє передачу інформації від датчиків-лідерів на базову станцію.

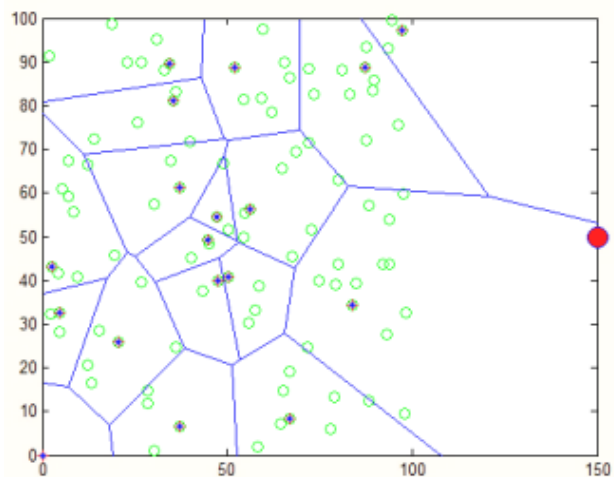


Рис. 2.10 Кластеризація БСМ

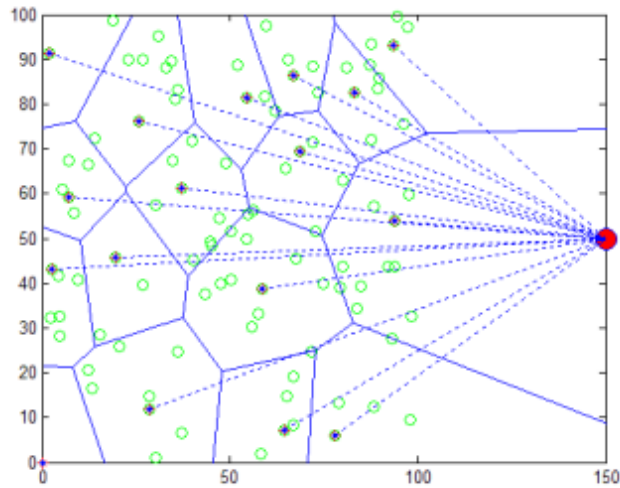


Рис. 2.11 Випадкове розміщення вузлів

Продуктами моделювання є таке твердження - алгоритм *DT* має менші період стабільності мережі і життєвий цикл. Перший вузол для алгоритму *DT* вийшов з ладу вже в 154 раунді, тоді як для алгоритму *LEACH* це сталося в 621 раунді, а для алгоритму *TEEN* в 1130 раунді.

На рисунку 2.12 показана тривалість періоду стабільності для всіх зазначених вище алгоритмів, а на рисунку 2.13 - залежність залишкової енергії мережі від числа раундів.

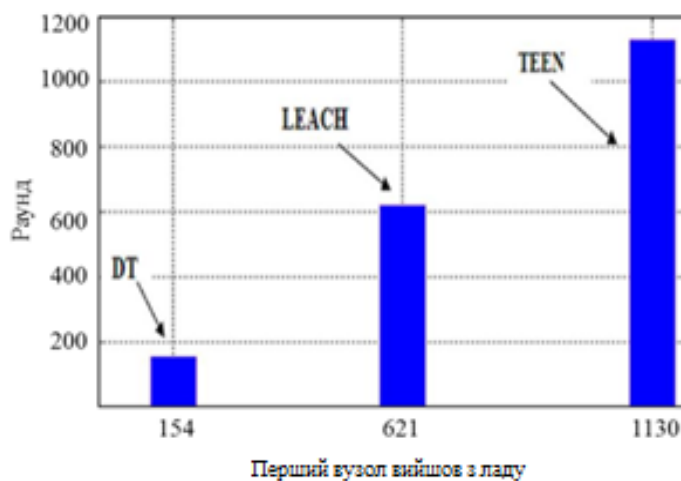


Рис. 2.12 Тривалість періоду стабільності

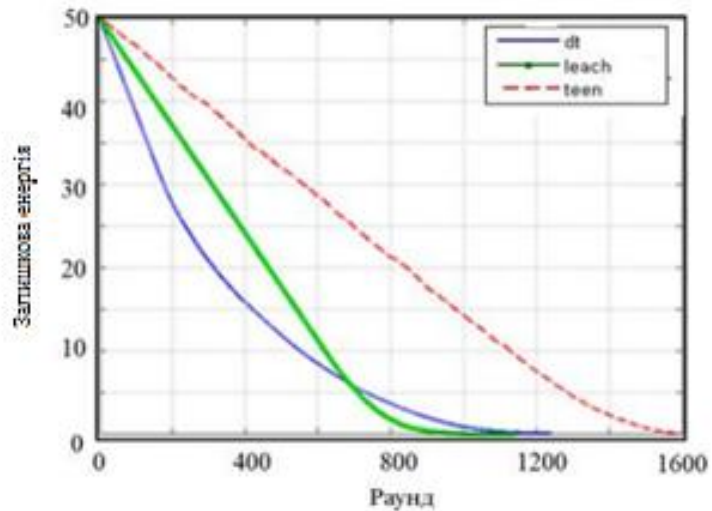


Рис. 2.13 Залишкова енергія

Виходячи з таких результатів напрашується висновок, що алгоритми кластеризації істотно ефективніше алгоритму прямої передачі. Для алгоритму *TEEN* тривалість періоду стабільності більш, ніж в 7 разів, а для алгоритму *LEACH* в 5 разів більше, ніж для алгоритму прямої передачі *DT*. На рисунку 2.14 і рисунку 2.15 наведені залежності числа функціонуючих вузлів і вузлів що вийшли з ладу відповідно.

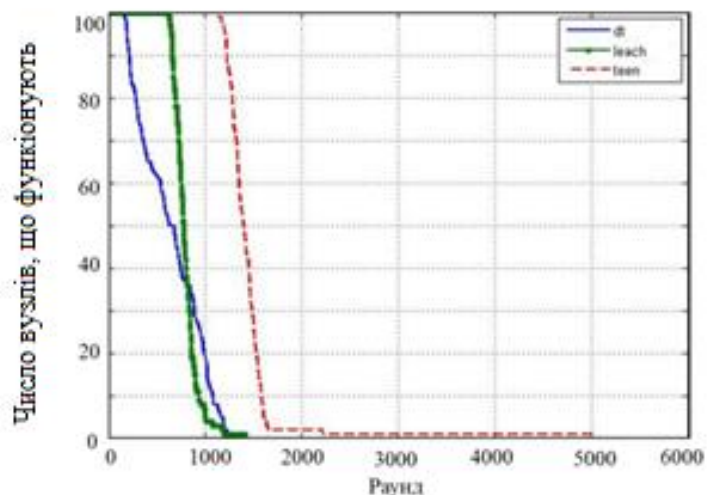


Рис. 2.14 Число функціонуючих вузлів

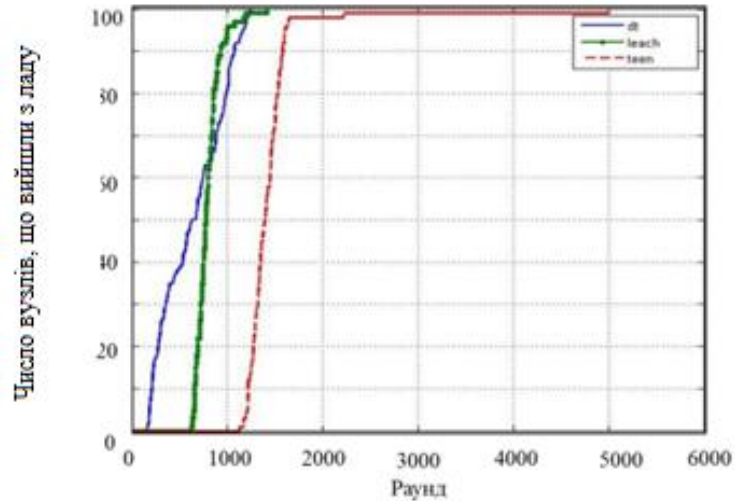


Рис. 2.15 Число вузлів, що вийшли з ладу

2.3.2 Другий сценарій

У цьому сценарії розглянемо гетерогенну сенсорну мережу, в якій є два типи вузлів - звичайні і просунуті. Сутність нової моделі полягає в тому, що значення початкової енергії в просунутих вузлах удвічі більше, ніж в звичайних, а кількісне відношення становить 10 до 90 %. Порівняємо ефективність застосування алгоритмів *DT*, *LEACH*, *TEEN* і *SEP* для моделі гетерогенної мережі. На рисунку 2.16 показано розподіл звичайних вузлів (кола, *Normal node*) і просунутих вузлів (+, *Advanced node*) випадковим чином на сенсорному полі.

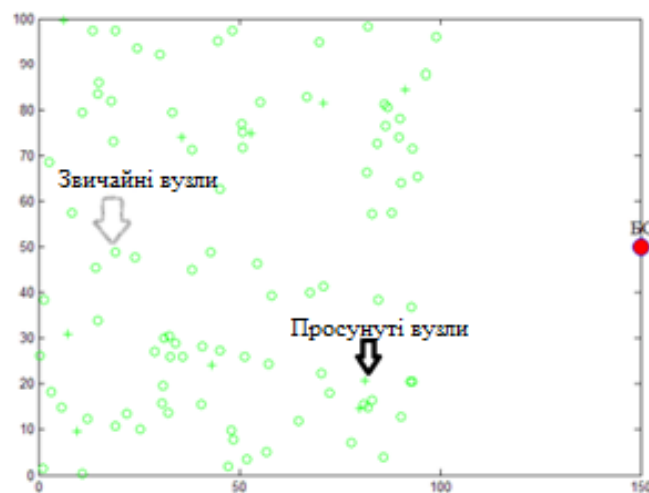


Рис 2.16 Випадкове розміщення вузлів в гетерогенній мережі

Підсумки моделювання зображені на рисунках 2.17, 2.18, 2.19, 2.20. Розбір результатів дає змогу бачити, що період стабільності у випадку використання алгоритму *SEP*, який спочатку враховує наявність в мережі гетерогенності, істотно більше в порівнянні з алгоритмами *LEACH* і *DT*. Разом з тим, останній вузол при використанні алгоритму *LEACH* виходить з ладу пізніше, ніж для алгоритму *SEP*. Алгоритм *TEEN*, хоча і не враховує енергетичне нерівність вузлів, має перевагу за всіма показниками, ніж алгоритми, які порівнювались з ним.

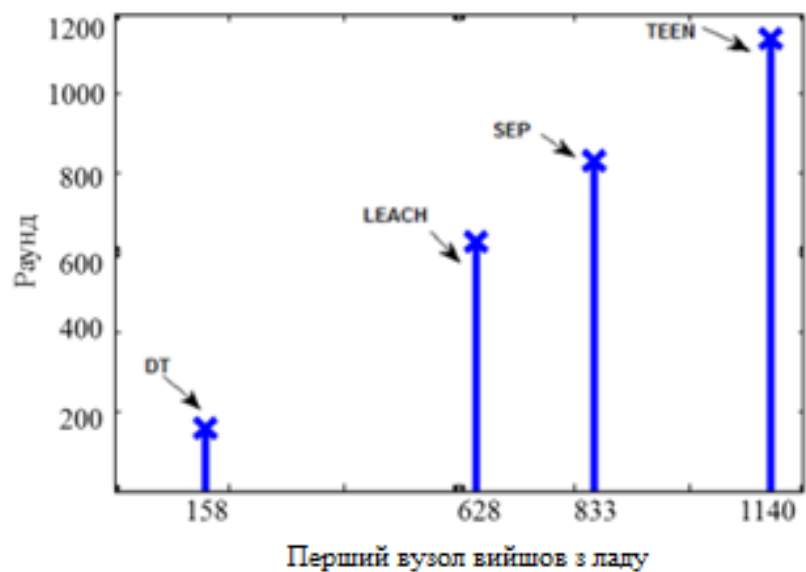


Рис. 2.17 Тривалість періоду стабільності

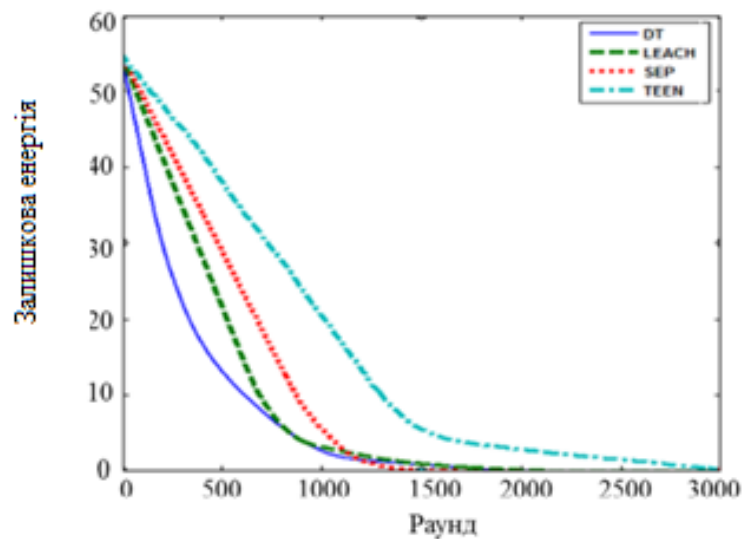


Рис. 2.18 Залишкова енергія

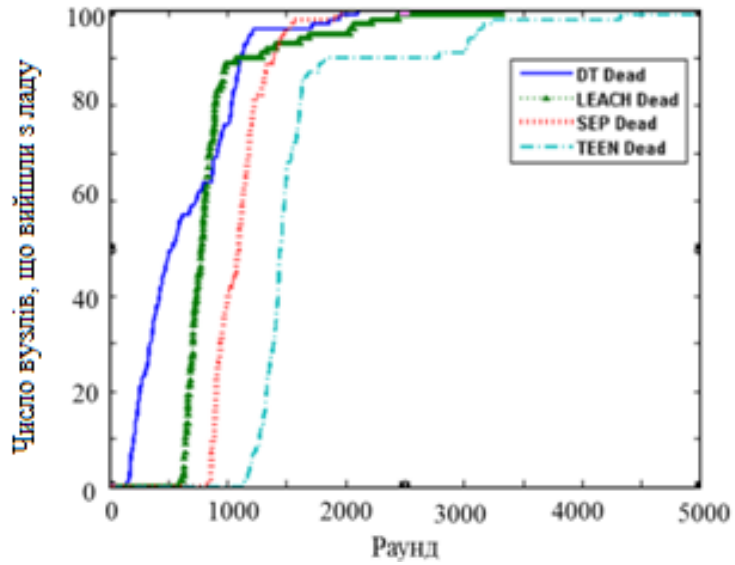


Рис. 2.19 Число функціонуючих вузлів

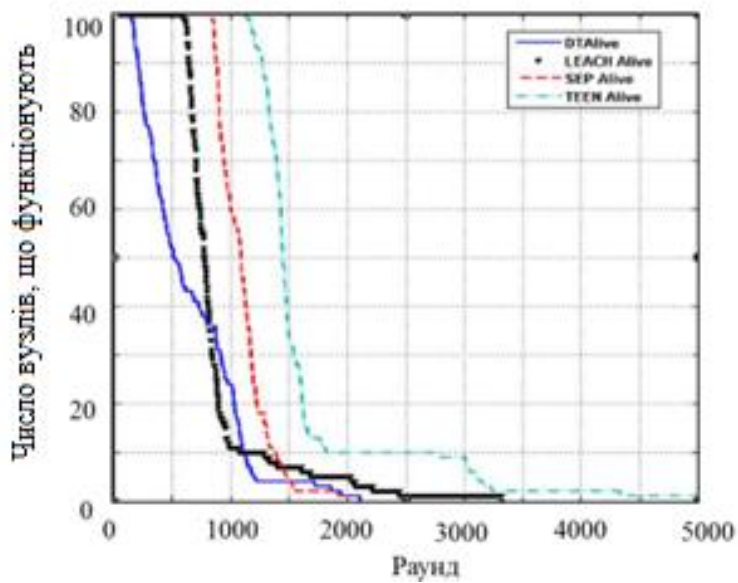


Рис. 2.20 Число вузлів, що вийшли з ладу

2.3.3. Третій сценарій

У третьому випадку пропонується озирнути багаторівневі по можливим енергетичним характеристикам датчиків гетерогенні мережі. При цьому гетерогенна сенсорна мережа містить датчики наступних рівнів: супервузли, просунуті і звичайні. Кожен датчик має свою первинну енергію, значення первинної енергії коливається в інтервалі 0,1 - 1 Дж.

Підсумок моделювання зображений на рисунках 2.21 і 2.22. Аналіз результатів моделювання показує, що і по тривалості періоду стабільності, і по значенню

залишкової енергії алгоритм *DEEC*, спочатку спеціалізований для багаторівневих гетерогенних мереж, значно ефективніший, ніж алгоритми *LEACH* і *DT*. Разом з тим, алгоритм *TEEN* у випадку багаторівневих гетерогенних сенсорних мереж краще, ніж спеціалізований для аналогічних цілей алгоритм *DEEC*, і по тривалості періоду стабільності, і за показником залишкової енергії.

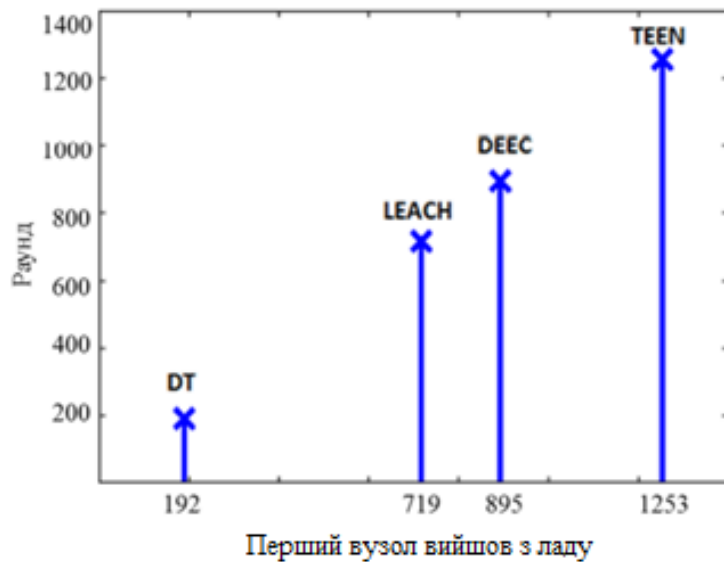


Рис. 2.21 Тривалість періоду стабільності

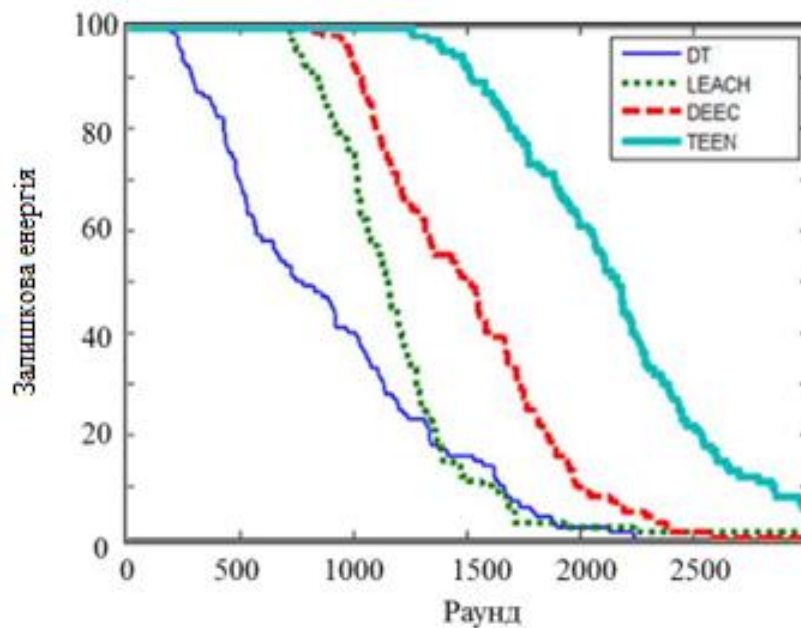


Рис. 2.22 Залишкова енергія

Результати всіх трьох випадків можна побачити в таблиці 2.3 і на рисунку 2.23. Демонструючи результатів моделювання, незалежно від виду мережі -

гомогенна, дворівнева гетерогенна або багаторівнева гетерогенна, можна точно сказати - алгоритм *TEEN* забезпечує найбільше значення тривалості періоду стабільності. Відсутність кластеризації при використанні алгоритму прямої передачі призводить до того, що тривалість життєвого циклу БСМ може зменшитися більш, ніж в 7 разів у порівнянні з застосуванням алгоритмів кластеризації.

Таблиця 2.3

Тривалість періоду стабільності

Алгоритми маршрутизації та сценарії	DT	LEACH	TEEN	SEP	DEEC
Перший сценарій (однорівневі БСМ)	53	620	1129	----	822
Другий сценарій (дворівневі БСМ)	58	628	1139	833	856
Третій сценарій (багаторівневі БСМ)	2	719	1253	----	895

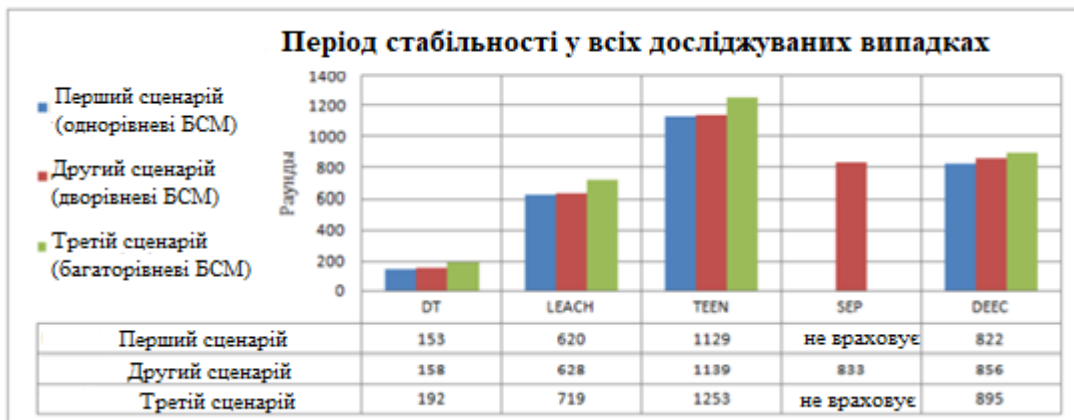


Рис. 2.23 Тривалість періоду стабільності в усіх досліджених випадках

Висновки

У розділі розглянуто основні алгоритми маршрутизації і самоорганізації для гомогенних і гетерогенних бездротових сенсорних мереж зі стаціонарними сенсорними вузлами, розміщеними на плоскій поверхні. За продуктами моделювання був виконаний порівняльний аналіз ефективності роботи алгоритмів *DT*, *LEACH*, *SEP*, *TEEN* і *DEEC* для різних сенсорних мереж (гомогенні, гетерогенні дворівневі, гетерогенні багаторівневі). Після всіх спостережень хочеться узагальнити:

1. Використання неієрархічних алгоритмів маршрутизації відносно ефективно для сенсорних полів невеликого розміру. Для великих сенсорних мереж використання неієрархічних алгоритмів недоцільно, оскільки вимагає великих енерговитрат і не забезпечує більш-менш рівномірного життєвого циклу для сенсорних вузлів.

2. Порівнюючи однорівневі і ієрархічні алгоритми маршрутизації, можна відзначити, що ієрархічні алгоритми представляють більше можливостей по реалізації різних додатків БСМ.

3. Ієрархічні алгоритми маршрутизації збільшують тривалість життєвого циклу мережі і стабільність, що підвищує надійність функціонування БСМ. Ієрархічна маршрутизація дозволяє гнучко вирішувати різні завдання з урахуванням можливостей сенсорних вузлів. При цьому, вузли з високою енергоємністю (можливо з постійним енергопостачанням) можуть агрегувати дані і передавати їх в мережу зв'язку загального користування, в той час як вузли з низькою енергоємністю можуть використовуватися виключно для збору даних.

4. Базовий алгоритм *LEACH* - вкрай ефективний протокол для гомогенних БСМ. Він допомагає знизити енерговитрати в 7 разів у порівнянні з прямою взаємодією сенсорних вузлів. У той же час, незважаючи на ротацію головних вузлів *CH* в кожному раунді, щоб домогтися балансування навантаження, *LEACH* не може забезпечити реальне балансування в разі сенсорних вузлів з різною кількістю початкової енергії, оскільки головні вузли *CH* обираються в термінах ймовірностей без енергетичних міркувань. Крім того, так як вибори *CH* виконується в термінах ймовірностей, важко рівномірно розподілити *CH* всієї мережі. Таким чином, існують обрані *CH*, зосереджені в одній частині мережі, і деякі вузли, в околицях яких немає *CH*.

5. Алгоритми *SEP* і *DEEC* перевершують по тривалості періоду стабільності і залишкової енергії алгоритми *DT* і *LEACH* в умовах застосування гетерогенних БСМ.

6. Алгоритм *TEEN* перевершує за тривалістю періоду стабільності і залишкової енергії всі розглянуті алгоритми і рекомендується до використання як в гомогенних, так і в гетерогенних БСМ.

РОЗДІЛ 3.

АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ З МОБІЛЬНИМИ ВУЗЛАМИ

3.1. Мобільні Бездротові Сенсорні Мережі (*MWSN*)

Традиційні Бездротові Сенсорні Мережі розроблені з використанням статичних вузлів (*SNS*) [17, 38, 22]. Представлені мережі вживаються в різноманітних сферах життєдіяльності людства, таких як охорона здоров'я [30, 36], військова, промисловість, моніторинг навколишнього середовища, стеження за метою на основі мультимедійних датчиків [29] та інших [25, 35, 20]. Велика кількість дослідів та експериментів було приділено проблемам БСМ зі стаціонарними вузлами. Проте, передові технології в Інтернет речей [21, 44] в своєму складі мають технології більш тонки застосунків, які вимагають мобільності їх вузлів [42]. Мобільність збільшує число додатків БСМ [26]. Вона також має можливість збільшити час функціонування датчиків, адже при надсиланні інформації між двома датчиками часто не використовуються ті самі ретранслюючі датчики в схемі та маршруті. Крім того, мобільність може поліпшити зв'язність мережі, так як мобільні вузли (*MN*) можуть допомогти зв'язати віддалені датчики від інших стаціонарних [36]. Мобільність дозволяє також збільшити покриття [21, 37]. Однак мобільність має і іншу сторону медалі, наприклад, вибуття мобільного датчика з зони радіусу зв'язку в процесі передачі повідомлень, що тягне за собою втрату даних. Для мобільних БСМ більш складними стають питання управління ресурсами, топологією, протоколи маршрутизації, складніше забезпечити необхідний рівень якості обслуговування і безпеки.

Датчики БСМ часто працюють в ситуаціях, коли немає змоги забезпечувати живлення або навіть пертурбацію батареї датчика. Тому визначальним параметром БСМ прийнято вважати залишкову енергію. Мобільність є дуже корисним етапом для БСМ, так як мобільні мережі менш схильні до розсіювання енергії, оскільки мобільні

мережі дуже чутливі до розсіювання енергії, що збільшує термін служби батареї та взагалі датчику. Ця функція досягається внаслідок рухливості датчиків, що збільшує коефіцієнт охоплення простору мобільного БСМ.

Зазвичай, в сенсорних мережах датчики самоорганізуються в кластери і датчик-лідер обирається для кожного з них. Датчики-лідери здійснюють збір даних з датчиків - членів кластера, здійснюють їх обробку і передачу даних на шлюз або базову станцію (БС). Таке агрегування даних в датчиках-лідерах істотно зменшує значення споживання енергії в мережі і збільшує значення тривалості життя мережі [29, 23, 33].

У розділі представлено новий алгоритм для вибору головного вузла кластера в БСМ з мобільними вузлами. Алгоритм заснований на поєднанні кращих властивостей двох відомих існуючих алгоритмів - *DCA (Distributed Clustering Algorithm)* [42] і *MBC (Mobility-Based Clustering)* [31]. Новий алгоритм є адаптивним алгоритмом кластеризації для БСМ з мобільними вузлами, що вказано і в його назві *MACA (Mobility Adaptive Clustering Algorithm)*. Використання алгоритму *MACA* очікується в наземному сегменті [7].

Питання розробки алгоритмів вибору головного вузла в БСМ вже більше десяти років займає важливе місце в дослідженнях по мережах зв'язку. Більшість алгоритмів кластеризації розроблено для БСМ зі стаціонарними вузлами. Такі алгоритми як *LEACH* [44], *LEACH-C* [43], *HEED* [42] і *TEEN* [28] ефективно використовуються для гомогенних і гетерогенних сенсорних мереж зі стаціонарними вузлами [3], що було розглянуто у розділі 2. Для всіх цих алгоритмів життєвий цикл сенсорної мережі ділиться на раунди. Кожен раунд складається з етапу формування кластера і етапу передачі зібраної датчиком-лідером інформації шлюзу або базової станції (БС).

Застосування цих алгоритмів для ефективною інтеграції бездротових сенсорних мережах з використанням мобільних вузлів широко не використовується. Останнє пов'язано з тим, що переміщення членів групи і рух головних вузлів, а не основ, викликають нестабільність групи за один раунд. Однак активність BSV можна використовувати для покращення певних функцій мережі. Наприклад, [40] пропонує використовувати модель руху для покращення підключення до мережі, а [5, 28] –

щоб запобігти виникненню помилок бездротових сенсорних мереж. Алгоритм LEACH [40] з мобільними вузлами LEACH-M покращив продуктивність мережі, але не так, як алгоритми передбачення DCA [24, 23], GMAC [26].

В [21, 33] запропоновано алгоритм на основі підгруп (DCA), заснований на використанні обчисленого коефіцієнта проєкції (PCC). У DCA кожен сенсор обчислює передбачене значення PCC відповідно до кількох факторів (простих, вимкнених, комбінованих). Вимоги до інтегрованого прогнозування включають показники зв'язку, страхування, мобільності та залишкової енергії. Значення PCC передається до всіх навколишнім сенсорам у групі радіостанцій і вибирається за максимальним значенням головного сенсора.

В роботі [26] запропоновано алгоритм групування мобільних пристроїв у GMAC з використанням даних топології мережі та прогнозів, орієнтованих на БСВ. Цей прогноз дозволяє ідентифікувати окремі датчики та групи БСВ, які йдуть разом або окремо. Кількість кластерів GMAC незмінна. У статті наведено оцінки для визначення найкращого розміру команди та розміру команди відповідно. Найбільша жива група вибирається на основі групи залишкової енергії та діяльності, до якої належить БСВ. В роботі [43] запропоновано алгоритм кластеризації, що дозволяє використовувати тимчасові інтервали TDMA (в разі їх вільності) не тільки членам свого кластера, а й членам іншого кластера, які опинилися внаслідок мобільності прохочі через поле даного кластера.

В алгоритмі *MBC* головний вузол традиційно вибирається за значеннями залишкової енергії та її мобільності. Для учасника кластера він вибирає найбільш підходящий головний вузол на основі значення ігрового значення, що може забезпечити стабільну взаємодію основних вузлів у команді. Останнє зменшує втрати пакетів і зменшує споживання енергії за рахунок невеликих змін членства в певній групі.

Враховуючи отримані результати [54, 53], при розробці нового алгоритму *MACA* ми використовуємо прості точкові прогнози для вибору головного вузла на основі комбінованих критеріїв прогнозу та введення групи за значеннями відповідності алгоритм *MBC*.

3.1.1. Різні випадки мобільності

Wireless Wireless Networking (MWSN) — це особливий клас бездротових сенсорних мереж, де мобільність відіграє важливу роль у функціях додатків. В останні роки рух сенсорних мереж став важливим напрямком досліджень БСМ. Діяльність БСМ можна класифікувати так:

- **Мобільний вузол для збору інформації.** У зборі інформації від нейронів беруть участь спеціальні клітинні залози або залози, які зменшують енергоспоживання системи передачі та збільшують життєвий цикл за рахунок зменшення середньої довжини шляху передачі даних.

- **Мобільна базова станція.** Мобільна БС може бути підключена між фрагментами мережі, що все одно зменшує споживання енергії та збільшує термін служби мережі.

- **Мобільність подій.** Перегляд події БСМ також може бути мобільним (наприклад, діяльність із встановлення цілей), а різні вузли БСМ «відповідають» за відстеження такої події.

- **Мобільність членів кластера і головного вузла кластера.** Переміщення ключових членів кластера та залоз у групі загалом позитивно впливає на вимірювання БСМ, що створює ряд нових проблем у допустимій мобільній БСМ, включаючи проблеми стабільності команди.

3.1.2. Моделі мобільності

Моделі руху можна розділити на такі категорії: (I) випадковий рух, (II) очікуваний рух і (III) керований рух. Різні типи моделей руху відображають різноманітність алгоритмів збору даних, що використовуються в кожній ситуації. Прикладом випадкової дії може бути набір датчиків, встановлених у тварини для збору інформації в природі. При цьому методі дуже важко контролювати і передбачати напрямок руху вузлів.

У запропонованому режимі руху очікувані шляхи сенсорних нейронів прогнозуються за допомогою різноманітних методів, при цьому сенсорне світло переходить у режим сну у час, який відведений для передачі даних. Керована мобільність включає систему введення даних з мінімальним шляхом (*MAPS*), щоб продовжити термін служби вузла за рахунок оптимізації мережі. Виходячи з

припущення, що обертовий вузол або базова станція підключений до кожного сенсорного вузла, він утворює блок планування руху (*MES*).

3.2. Адаптивний алгоритм кластеризації для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами (МАСА)

Новий адаптивний алгоритм під назвою *МАСА (Mobility Adaptive Clustering Algorithm)*, який був представлений для бездротових сенсорних мереж з мобільними вузлами. За допомогою вдосконаленого групового алгоритму мобільний сенсорний вузол *SPP (Single Point Predictor)* вибирається як найважливіша одиниця групи на основі інтегрованого комплексного прогнозування (алгоритм *DCA*), інші вузли є членами групи, визначеними на основі певного значення, яке вказує на їх придатність для певного вузла (алгоритм *MBC*). Поєднання двох відомих алгоритмів забезпечує значне збільшення терміну служби та стабільності мережі. Розроблений алгоритм призначений для використання в наземному сегменті, мережах датчиків польоту та інших.

Модель для дослідження алгоритму МАСА

При розробці алгоритму *МАСА* була прийнята наступна модель мережі:

- Сенсорна мережа є гомогенною, тобто всі БСВ мають однакові базові параметри (початкова енергія, радіус дії);
- Топологія мережі змінюється, і БСВ можуть переміщатися зі швидкістю від 0 до 2 м / с (типіві значення при дослідженнях мобільних сенсорних мереж);
- БСВ здійснюють свою активність без централізованого управління;
- Базова станція знаходиться в стаціонарному стані і радіоканал симетричний.

Отже, можна зауважити, що максимального ефекту від алгоритму можна досягти, якщо кількість груп, що вивільняються під час обертання бездротового нейрона, дорівнюватиме кількості вузлів у групі. Важливо вибрати режим руху БСВ. Випадковий вибір руху, перетину, напрямку руху тощо. наприклад типові моделі [38].

Відтепер ми будемо використовувати режим руху, близький до руху людини, наприклад, ходьбу в реальних ситуаціях. Слід зазначити, що в нейронних мережах з мобільними нейронними мережами швидкість роботи залози обмежена 2

м/с, що дорівнює швидкості руху пішоходів. Розподіл рухомих залоз за перепадами швидкостей руху здійснюється без будь-якої різниці між 0 і 2 м/с.

Для визначення руху кожного вузла доступний наступний алгоритм:

- 1) Випадковим чином відповідно до рівномірного розподілу обирається швидкість переміщення вузла.
- 2) Випадковим же чином обирається напрямок переміщення.
- 3) В обраному напрямку з обраною швидкістю БСВ може переміщатися протягом заданого періоду часу на певну відстань. Після того, як досягнута задана межа переміщення по часу або по відстані, обирається новий напрямок переміщення.
- 4) Потім можливо деякий час очікування (до кінця раунду).
- 5) Повернення до першого кроку.

Для поширення електромагнітних хвиль також приймається стандартна модель для БСМ. При цьому для оцінки втрат враховується стан БСВ: знаходяться вони в зоні прямої видимості (*LOS*) чи ні (*NonLOS*) [41].

3.2.1. Комбінований критерій прогнозування

Відповідно до реалізації алгоритму *DCA*, комбіновані вимоги прогнозування включають потреби в підключенні, страхуванні, мобільності та залишковій енергії. Комбіновані вимоги до $B(S)$ прогнозу часу БСВ T_0 та t визначаються за формулою:

$$CC(s_i) = \alpha \times ConC(s_i) + \beta \times CovC(s_i) + \frac{\gamma}{1+MC(s_i)} + \zeta \times REC(s_i), \quad (3.1)$$

$$B(3.1) \quad \alpha + \beta + \gamma + \zeta = 1.$$

В роботах [54, 53] розглянемо три евристичні предиктори: *SPP* (*Single Point Predictor*), *LEP* (*Linear Extrapolation Predictor*) та гібридний *HP* (*Hybrid Predictor*). Дослідження показали, що прості прогнози *SPP* забезпечують найдовший термін служби сенсорної мережі. Вимоги до комплексних умов прогнозування (*PCC*) тепер мають бути представлені через час R відповідно до дати цих вимог;

$$HCC = [(CC_1, t_1), (CC_2, t_2), \dots, (CC_n, t_n)] \quad (3.2)$$

де $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Простий точковий предиктор *SPP* (*Single Point Predictor*) завжди передбачає наступне значення, як попередню величину *HCC*:

$$PCC = SPP(t_c) = CC_n \quad (3.3)$$

3.2.2. Алгоритм МАСА

Як і більшість існуючих алгоритмів, розроблений алгоритм *МАСА* складається з двох фаз: групи формування фази, де створюється кілька груп і таблиць *TDMA*, і фази безперервного стану, де основні вузли збирають дані та проходять через шлюз або БС.

Фаза формування кластера. Вибір головного вузла кластера.

З початку кожного періоду кожен БСВ обчислює свої прогнози *PCC* на основі одноточкової проекції (*SPP*). Потім значення *PCC*, обчислені на другому кроці алгоритму, поширюються на навколишній БСВ.

Формування кластера складається з таких фаз:

1. **Оголошення головного кластера.** Після вибору найбільших вузлів у кластері БСВ надсилає повідомлення, що це основний вузол. У повідомленні вказується його місцезнаходження, доступна швидкість передачі на кордоні тощо.
2. **Запит на приєднання до головного вузла.** Відповідно до алгоритму *MBC* [31], кожен вузол в мережі вибирає найбільш підходящий головний вузол для об'єднання кластера на основі відповідної ціни. Він використовується для демонстрації ефективності приєднання до певного сегмента БСВ. Значення відповідності можна визначити наступним чином:

$$W_{ij} = a \times \frac{E_{j-current}}{E_{max} \times N_{j-current}} + b \times \left(1 - \frac{d_{ij}}{R_{tran}}\right) + c \times \frac{\Delta t_{ij}}{t_{frame}} \quad (3.4)$$

Де W_{ij} - значення придатності, присвоєне сенсорному вузлу i та вказує його придатність для зв'язку з головним вузлом кластера j ; $E_{j-current}$ - поточна енергія головного вузла кластера j ; $N_{j-current}$ - кількість членів кластера j після приєднання сенсорного вузла i до головного вузла j ; d_{ij} - відстань між сенсорним вузлом i і

головним вузлом кластера j ; Δt_{ij} - розрахунковий час взаємозв'язку між сенсорними вузлами кластера i, j ; t_{frame} - тривалість кадру даних.

У формулі (3.4) $a + b + c = 1$ постійні коефіцієнти a, b, c можуть набувати значень з інтервалу $(0, 1)$ і представляють вагоме значення кожного з факторів (енергії, відстані, часу).

1. Підтвердження головного вузла. Після отримання запиту на контакт від учасника кластера вузол головного розділу надсилає підтвердження членства в кластер БСВ і встановлює інтервал часу, протягом якого БСВ може передавати інформацію в кластер. Розклад транслюватиметься на всіх БСВ у команді.

➤ **Фаза стаціонарного стану.**

Майже кожен БСВ прокидається один раз до часу передачі даних відповідно до розкладу *TDMA* і повертається в режим сну після півночі. Основним напрямком роботи команди є постійна активна розсилка повідомлень із запитами інформації, отримання даних БСВ, а також надсилання та отримання інших повідомлень, необхідних для підтримки мережі.

Запропонований алгоритм *MACA* працює за наступним механізмом:

Крок 1: Головний вузол кластера обирається по максимуму *PCC*;

Крок 2: Головний вузол передає широкосмугове оповіщення про те, що він став головним;

Крок 3: Вузли обчислюють значення стабільності і обирають найбільш підходящий головний вузол кластера для приєднання;

Крок 4: Головний вузол формує *TDMA* розклад;

Крок 5: Вузли передають дані;

Крок 6: Головний вузол агрегує дані і передає на базову станцію;

Крок 7: Новий раунд починається з 1 пункту.

Оскільки нейронна мережа складається з клітинних залоз, основним процесом для безперервної фази мережі є можлива модифікація БСВ зі старої групи в нову. Схема переходу показана на рисунку 3.1. У цьому випадку ключові залози групи видаляють інформацію про члени кластера з таблиці передачі, коли вони її не отримують. У той же час, якщо БСВ (член команди) не отримує запит на інформацію

від головного вузла, цей вузол спробує перенаправити повідомлення на інший верхній вузол групи. Для цього кожен великий вузол у групі надає певну кількість вільного часу для передачі даних.

Окрім того, що основний кластер і БСВ містять інформацію про найближчий час передачі даних, і ви можете заздалегідь підтвердити, що БСВ залишиться в команді, коли закінчиться запит на передачу даних. Якщо ви впевнені, що БСВ не залишиться в групі, вузол повинен надіслати запит на приєднання до нової групи та спробувати запобігти великій втраті пакетів до того, як з'єднання буде втрачено провідним.

На рисунку 3.1 вузол 11 приєднується до кластеру 1, в той час як вузол 4 залишає кластер. Головний вузол кластера 1 видаляє вузол 4 з розкладу *TDMA* і додає вузол 11 до розкладу *TDMA*, який коригується на основі розрахункового часу підключення Δt між членом кластера і головним вузлом кластера в порядку зростання [22].

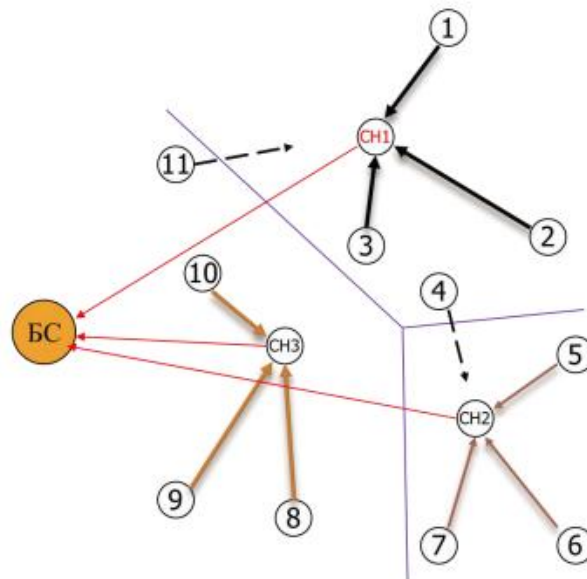


Рис. 3.1 БСВ залишає старий кластер і приєднується до нового

3.3 Результати моделювання

Моделювання нашого макету було виконано в *C#.NET* з використанням таких властивостей сенсорної мережі. БСВ розподіляється випадковим чином на відстані 400м*400м, а кількість датчиків коливається від 100 до 400 з кроком в 50. Параметри мережі, використані для моделювання, та їх значення зведені в Таблицю

3.1. Алгоритм *MACA* схожий на алгоритми *LEACH-M* і *DCA* з точки зору терміну служби мережі, стабільності та кількості успішно переданих пакетів. На рисунку 3.2 показані знімки екрана, що показують процес збирання.

Таблиця 3.1

Параметри моделювання

Параметр	Позначення	Значення
Початкова енергія на вузол	E	2 Дж
Tx/Rx	E_{elec}	50 нДж/bit
Постійне підсилення	e_{fs}	10 пДж/біт/м
Мультимережева стала	e_{fs}	0,0013 пДж/бит/м
Втрати на ділянках (експоненціальні)	$\sqrt{\frac{e_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$	87
Радіус сенсора	r	25 м
Ширококуткова зона мовлення	R	2r
Радіус кластеру	$1-hop$	2r
Швидкість передачі даних	9600	біт/с
Радіус зв'язності	2r	50 м
Розміри поля (X, Y)	(400, 400)	М

3.3.1. Тривалість життєвого циклу мережі

Тривалість життєвого циклу мережі може бути визначена одним із наступних способів:

- час від початку функціонування мережі до виходу з ладу першого БСВ (*FND*);
- час від початку функціонування мережі до моменту часу, коли функціонуючим залишається заданий відсоток БСВ (*PNA*);
- час від початку функціонування мережі до виходу з ладу останнього БСВ [23].

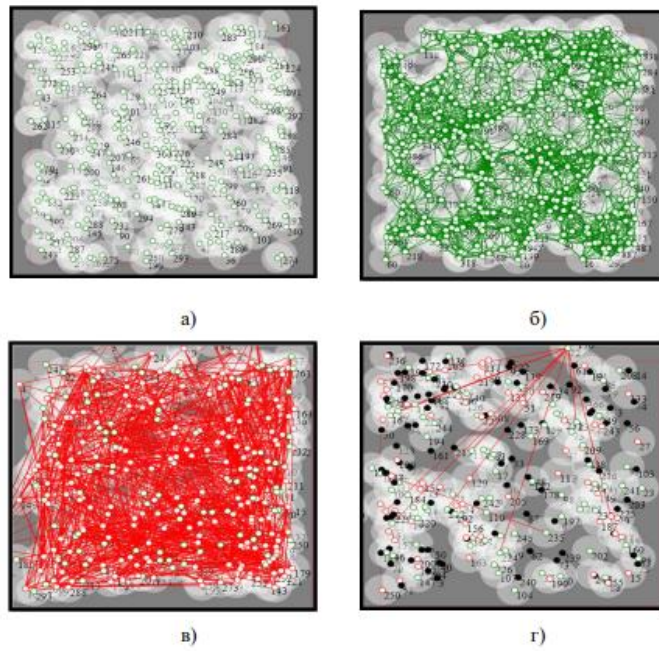


Рис. 3.2 Екранні форми при моделюванні:

- а - випадкове розміщення БСВ; б - широкосмугове оповіщення *PCC*;
- в - кластеризація; г - сенсорна мережа в процесі функціонування

На рисунку 3.3 наведені результати моделювання для випадку, коли функціонуючими залишається 40% БСВ. З результатів видно, що у вибраній зоні роботи зміни розміру мережі та наша тривалість життєвого циклу усієї сенсорної мережі при використанні алгоритму *MACA* значано краща, ніж для *LEACH-M* і *DCA*.

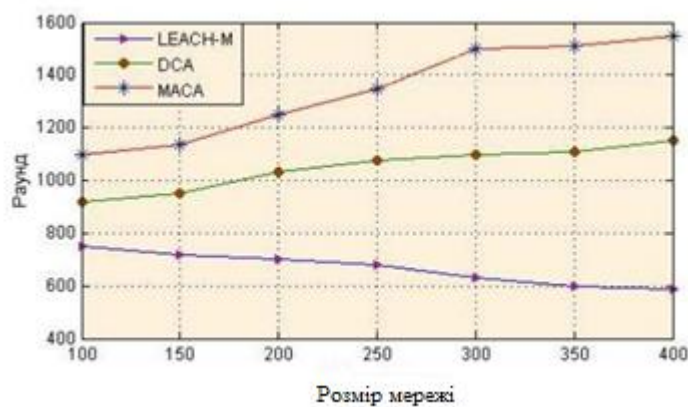


Рис. 3.3 Тривалість життєвого циклу для *MACA*, *DCA* та *LEACH*

3.3.2. Період стабільності

Період від початку мережі до першого ураження БСВ (*FND*) також відомий як період стабільності. На рисунку 3.4 показані порівняльні характеристики періоду стабілізації в алгоритмах *MACA* і *DCA*. Алгоритм *LEACH* не може конкурувати з цим алгоритмом.

Як видно з результатів моделювання, період стабільності нового алгоритму збирання довший, ніж у алгоритма *DCA*. Результати моделювання також показують, що час стабільності обох алгоритмів збільшується зі збільшенням розміру мережі.

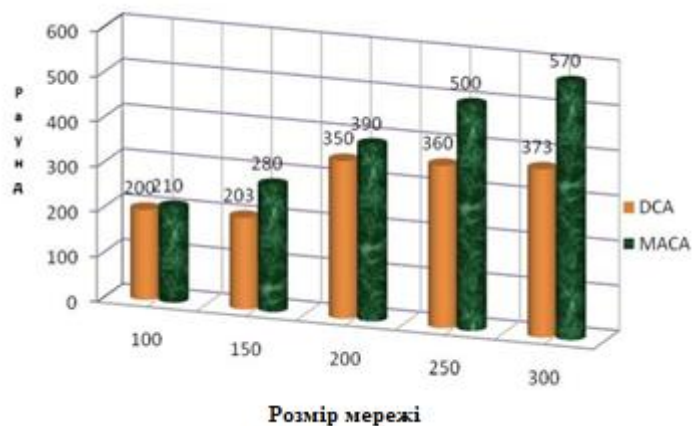


Рис. 3.4 Період стабільності для *MACA* та *DCA*

3.3.3. Число успішно переданих пакетів

У цьому випадку підвищення продуктивності вимірюваної мережі шляхом оцінки кількості переданих пакетів є важливим показником порівняно з алгоритмами збору. Як видно з рисунка 3.5, середні значення кількості пакетів, успішно переданих алгоритмами *MACA* і *DCA*, майже рівні.

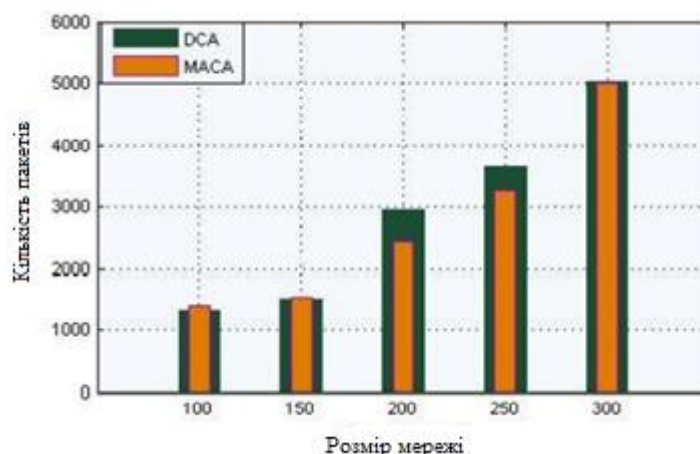


Рис. 3.5 Середнє число успішно переданих пакетів *MACA* та *DCA*

Враховуючи, що вдосконалений нами алгоритм *MACA* сильно перевершує алгоритм *DCA* за такими параметрами, як життєвий цикл і період стабільності, рекомендується використовувати цей алгоритм, включаючи мережі датчиків польоту та фрагменти землі [7].

Висновки

1. Новий адаптивний алгоритм стиснення для бездротової сенсорної мережі з мобільними датчиками був розроблений шляхом поєднання позитивних рис двох попередніх алгоритмів, відомих як *DCA* і *MBC*. При виборі головного вузла кластера використовується комбіноване значення прогнозу алгоритму *DCA*, а також значення сумісності алгоритму *MBC* на додаток до елементів кластера у його верхній частині.

2. Результати нашого моделювання довели, що запропонований алгоритм життєвого циклу значно перевершує популярний алгоритм *LEACH-M*. Термін служби алгоритму *MACA* значно довший, ніж у алгоритмі передбачення *DCA*, який вищий, ніж у *LEACH-M*. Алгоритм *MACA* перевершує алгоритм *DCA*, а саме під час стабілізації і кількості успішно розподілених пакетів, яка подібна до обох алгоритмів.

РОЗДІЛ 4.

ВІДМОВОСТІЙКИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРотовИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

4.1. Огляд досліджень в предметній області

У бездротових сенсорних мережах (БСМ) з кластерною структурою більшість головних вузлів кластера відігравали важливу роль у роботі мережі та обробці даних. Авжеж, будь-який дефект у роботі цих вузлів може стати причиною заводської роботи та надійності мережі навіть призвести до збою команди в

цілому. Збереження працездатності за наявності відмов його складових частин визначаються як ключові проблеми в області проектування і експлуатації бездротових сенсорних мереж БСМ. Відмова деяких вузлів в БСМ майже невідхильний через такі причини: несправність обладнання, відключення електроенергії, несправність програмного забезпечення, помилки зв'язку, зловмисна атака тощо.

На сьогоднішній день, розвиток мереж зв'язку здійснюється на основі концепції Інтернету Речей [1, 6, 14]. Технологічною базою для реалізації цієї концепції є бездротові сенсорні мережі (БСМ) [11, 10]. БСМ є самоорганізуючими мережами і складаються з безлічі розподілених в просторі бездротових сенсорних вузлів (БСВ), призначених для моніторингу характеристик навколишнього середовища або об'єктів, розташованих в ній [12]. Ресурси БСВ обмежені з точки зору можливості обробки інформації, пропускну здатності, обсягу пам'яті, обчислювальних можливостей, що істотно відрізняє БСМ від інших мереж [35]. Особливості, такі як низька вартість, низьке енергоспоживання, компактний розмір і надійність цих сенсорних вузлів допомагають їм в тому, щоб бути використовуваними для різних додатків [22]. Один з важливих додатків сенсорних мереж є виявлення, класифікація та визначення місця розташування конкретних епізодів та цілей. Наприклад, відправка сенсорної мережі на поле бою для виявлення швидкісних танків [39]. Останніми роками, виникло нове вживання сенсорних мереж - літаючі сенсорні мережі [7, 8]. Інтеграція даних є звичайною операцією в багатьох програмах БСМ, а саме в ієрархічних мережах кластера. Кластеризація широко використовується для збільшення життєвого циклу БСМ, зниження споживання енергії, виключення додаткових даних. Цим питанням присвячена велика кількість робіт у сфері кластеризації БСМ, як для сенсорних областей на площині, так і для сенсорних мереж у тривимірному просторі. [41, 44, 1, 15, 2]. Наявність мобільності сенсорних вузлів зажадало розробки спеціальних алгоритмів кластеризації [39, 32], в тому числі і з прогнозом [25, 19, 4]. З розвитком БСМ проблеми розробки відмовостійких алгоритмів стають все більш цікавими [13].

Відмовостійкість (*fault-tolerance*) в розділі розглядається на основі сучасних уявлень *ITU-T* [31] як спроможність мережі здійснювати власні функції навіть при

наявності збоїв. Відмова деяких сенсорних вузлів в БСМ практично неминуча внаслідок різних причин: енергетичне виснаження, відмова апаратних засобів, збій програмного забезпечення, помилки в лініях зв'язку, шкідлива атака і т.д. [30]. Тому слід розглянути можливість виявлення несправностей і відновлення роботи для різних застосувань БСМ. Існує ряд робіт, присвячених загальним проблемам відмовостійкості для БСМ [36], алгоритмам (схемами) забезпечення відмовостійкості в сукупності з економією енергетичних ресурсів [70, 34, 46, 25]. На жаль, в цих рішеннях не використовується вже накопичений позитивний досвід по розробці алгоритмів кластеризації без урахування відмовостійкості. В ієрархічних способах кластеризації сенсорні вузли виконують різні ролі, і виникають дві категорії сенсорних вузлів: головний вузол кластера (*CH - Cluster Head*) і учасники кластера. Головні вузли збирають дані від вузлів - учасників кластера, обробляють їх і передають інформацію на шлюз або базову станцію. Таке об'єднання даних між ключовими вузлами значно знижує споживання енергії в мережі, подовжує період життєвого циклу та дозволяє легко впроваджувати графіки та уникати зіткнень. Стандартний зразок ієрархічної кластеризації в БСМ ілюструється на рисунку 4.1.

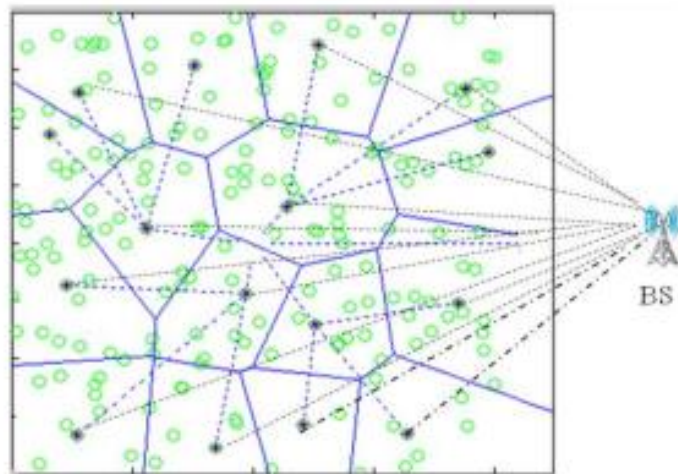


Рис. 4.1 Кластеризація БСМ

На даний момент найбільш ефективним алгоритмом для БСМ є TEEN, з однорідними та неоднорідними стаціонарними сенсорними вузлами на площині [22, 17]. Тому на його основі було прийнято рішення розробити відмовостійкою

послідовність операцій, використовуючи всі позитивні властивості данного алгоритму.

У розділі пропонується новий відмовостійкий алгоритм кластеризації для БСМ *FT-TEEN* (*Fault-Tolerance Threshold-sensitive Energy Efficient Network algorithm*), який є модифікованою версією добре відомого алгоритму *TEEN*. Результати моделювання показали, що алгоритм *FT-TEEN* значно збільшується кількість успішно переданих пакетів від учасників кластера до головного вузла і від головного вузла до шлюзу в порівнянні з алгоритмом *TEEN*. Новий алгоритм передбачається використовувати в наземних сегментах літаючих сенсорних мереж.

4.2. Алгоритм *TEEN*

Алгоритм *TEEN* - це швидкий, залежний від подій алгоритм, який застосовує метод випадкового відбору для розподілу енергетичних навантажень між вузлами бездротової сенсорної мережі. Алгоритм *TEEN* обіграє всі відомі алгоритми маршрутизації за ефективністю, як в однорідних, так і в неоднорідних стаціонарних БСМ. Алгоритм *TEEN* є *LEACH*-подібним алгоритмом [41] і його робота заснована на поділі всього періоду часу на рівні періоди, після чого обирається новий головний вузол в кластері. Алгоритм *TEEN*, на відміну від алгоритму *LEACH*, має кілька порогових значень. Головний вузол може встановлювати своїм вузлам «жорсткий» (*hard*) і «м'який» (*soft*) пороги:

- Жорсткий поріг (*Hard Threshold*): вузол надсилає інформацію головному вузлу лише в тому випадку, якщо обсяг збережених даних знаходиться в межах заданого ліміту;
- М'який поріг (*Soft Threshold*): вузол надсилає інформацію головному вузлу лише в тому випадку, якщо обсяг накопичених даних змінився щонайменше на величину, що перевищує або дорівнює м'якому порогу.

4.2.1. Фаза формування кластеру

Фаза формування кластера в алгоритмі *TEEN* подібна фазі формування кластера в алгоритмі і виглядає наступним чином.

На стадії утворення кластера кожен вузол датчика генерує випадкове число від 0 до 1. Всякий сенсорний вузол має поріг $T(n)$, який відповідає заздалегідь визначеній кількості основних сенсорних вузлів у мережі. Якщо сукупне випадкове число менше $T(n)$, вузол датчика може стати основним у поточному періоді життя БСМ, інакше цей вузол зостається лише членом (учасником) кластера. Обчислення $T(n)$ є важливим завданням у реалізації алгоритмів *TEEN* і *LEACH*.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{1}{1-P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1)$$

В (4.1) P - спричинений відсоток головних вузлів серед усіх сенсорних вузлів. Задовільне значення P оцінюється в 5% від загальної кількості сенсорних вузлів. Змінна r відповідає поточному інтервалу роботи сенсорної мережі, G показує кількість вузлів датчика, які не були обрані головними за минулі $1/P$ інтервалів. До того ж, при виборі головного вузла інші сенсорні вузли обирають до якого кластеру вони хочуть приєднатися на основі потужності сигналу (*RSS- Received Signal Strength*) отриманого від головного вузла.

4.2.2. Фаза передачі даних (*Steady-state phase*)

Коли всі вузли зібрані в кластери, головний вузол створює розподіл передачі інформації на основі методу *TDMA*, що забезпечує відсутність конфліктів при передачі повідомлень. Учасники кластера постійно збирають дані. Вузли будуть передавати дані в поточний період кластеру тільки за умови поточного значення:

- більше, ніж жорсткий поріг;
- відрізняється від заданого значення на величину, більшу або рівну м'якому порогу.

4.3. Алгоритм *FT-TEEN*

Запропонований алгоритм являє собою модифікований варіант алгоритму *TEEN*, вводить резервний механізм для кластеризації, виявлення і відновлення помилок, як видно на рисунку 4.2:



Рис. 4.2 Блок-схема для запропонованого алгоритму

4.3.1. Модель для дослідження алгоритму *FT-TEEN*

При розробці алгоритму *FT-TEEN* була прийнята наступна модель мережі:

- Сенсорна мережа є гомогенною, тобто всі БСВ мають однакові основні параметри (початкова енергія, радіус дії);
- БСВ працює без централізованого управління;
- Запропонований механізм можна застосувати до багатьох ієрархічних протоколів маршрутизації, таких як протокол *LEACH* тощо;
- Базова станція – нерухома і радіоканал симетричний.

Стандартна модель також прийнята для бездротових сенсорних мереж для поширення електромагнітних хвиль. При цьому для оцінки втрат враховується положення сенсорних вузлів, чи перебувають вони в зоні прямої видимості (*LOS*) чи не перебувають (*NonLOS*) [41].

Запропонований алгоритм являє собою модифікований варіант протоколу *TEEN*, вводить резервний механізм для кластеризації і складається з трьох фаз.

4.3.2. Фаза формування кластера. Вибір головного (*CH*) і резервного головного (*sub-CH*) вузлів кластера

У фазі утворення кластера вибираються головні і резервні головні вузли кластера. Коли всі вузли розташувалися в кластері, головний вузол надсилає широкомовне повідомлення про те, що він став головним. Поза тим, після одержання цих повідомлень, всякий БСВ в мережі вибирає найбільш задовільний головний вузол кластера для приєднання на основі потужності прийнятого сигналу *RSS (Received Signal Strength)* від головного вузла. Потім головний вузол *CH* виявляє серед учасників кластера такий БСВ, у якого залишкова енергія максимальна і

обумовлює його як резервний головний вузол *sub-CH* і переказує дану інформацію учасникам кластеру. Рис. 4.3 ілюструє фазу формування кластера в розробленому алгоритмі.

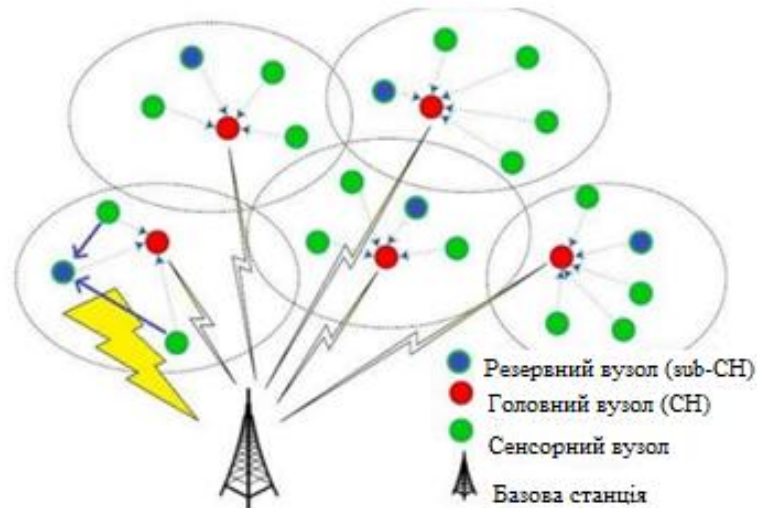


Рис. 4.3 Кластеризація в розробленому алгоритмі

В алгоритмі 4.1 наведено алгоритм для фази формування кластера, а на рисунку 4.4 - блок-схема для розробленого алгоритму.

- Алгоритм 4.1. Фаза формування кластеру.

- 1: **Зробити** { // повторити для R раундів,
- 2: **Якщо** ($E_{init}(s) > 0 \ \& \ s \in G$) **То**
- 3: $r \leftarrow$ випадкове $(0,1)$;
- 4: Обчислити $T(s)$; // вид (1)
- 5: **Якщо** ($r < T(s)$), **То**
- 6: $CH\{s\} = TRUE$; вузол стає головним вузлом (істина)
- 7: **Інакше**
- 8: $CH\{s\} = FALSE$; вузол не буде CH (брехня)
- 9: **Кінець якщо**
- 10: **Кінець якщо**
- 11: **Якщо** ($CH\{s\} = TRUE$), **То**
- 12: **ВС** (ADV) включає в себе \leftarrow передачу рекламних повідомлень;
- 13: Приєднати (ID_i , Залишкова енергія); //приєднання неголовного вузла;
- 14: Оберіть вузол з максимальною енергією, як резервний (*sub-CH*)

15: Кластер(s); //кластер сформован s ;

16: Кінець якщо

R : Раунд

$E_{init}(s)$: Початкова енергія

$T(s)$: Порогове значення

Msg : Перевірка повідомлення

ADV : Повідомлення від CH

BC : Широкомовне повідомлення

PCK : Пакет

ID_i : Ідентифікатор вузла ID

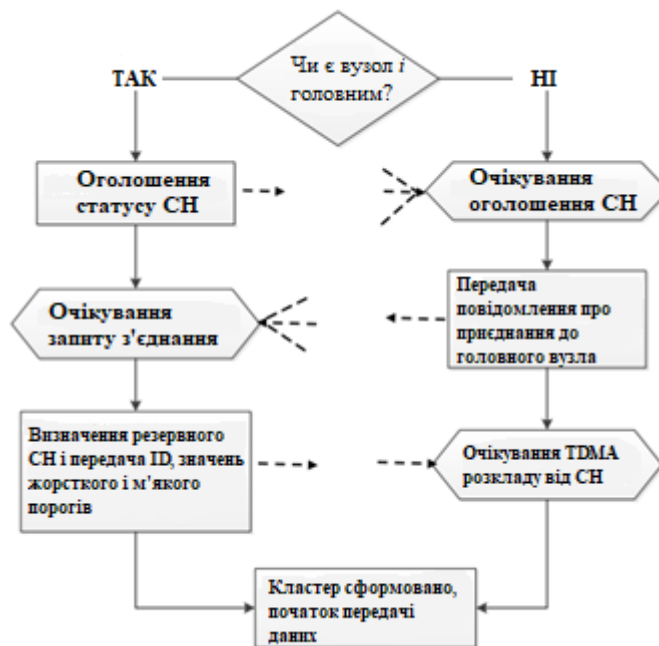


Рис. 4.4 Блок-схема формування кластера для розробленого алгоритму

4.3.3. Фаза передачі даних

У фазі передачі даних CH , а при потребі і $Sub-CH$, одержують поточні дані від членів кластера. Отримавши всі дані, головний вузол збирає та узагальнює їх, і лише потім відправляє їх на базову станцію та шлюз. Так само, як при здійсненні алгоритму $TEEN$, існування жорсткого порогу (HT) скорочує число повідомлень, затим що передача відбувається тільки тоді, коли поточна енергія перебуває в заданому радіусі дії. До того ж, м'який поріг також зменшує кількість повідомлень,

виключаючи ті утворення, яких замінило значення енергії принаймні на порогове значення.

4.3.4. Виявлення та відновлення помилок

Запропонований алгоритм *FT-TEEN* виявляє і відновлює помилки згідно наступним механізмом (алгоритм 4.2):

Крок I: Підготовка до роботи головного вузла (*CH*) і резервного головного вузла (*Sub-CH*) в кожному кластері;

Крок II: Якщо відповідь не надходить від головного вузла (*CH*) протягом зазначеного інтервалу часу;

В ТАКОМУ РАЗІ

Крок III: Головний вузол (*CH*) ознаменується як несправний і резервний головний вузол (*Sub-CH*) стає головним вузлом в кластері;

Крок IV: Якщо немає відповіді від резервного головного вузла (*Sub-CH*) протягом зазначеного інтервалу часу;

В ТАКОМУ РАЗІ

Крок V: Резервний головний вузол (*Sub-CH*) ознаменується як неякісний і з'являється новий резервний головний вузол з учасників кластера.

- Алгоритм 4.2. Виявлення та відновлення помилок

Зробити { //Для кожного кластеру (с)

1: Перевірка стану *CH* та *Sub-CH*

2: Якщо відповідь не приходить від головного вузла (*CH*)

3: Відмітити *CH* як несправний, $CH \leftarrow sub-CH$ // замінити на резервний *CH*

4: Якщо немає відповіді від резервного вузла (*sub-CH*)

5: Відмітити *sub-CH* як несправний, *CH* знайти новий (*sub-CH*)

}

Для передачі даних в *FT-TEEN* використовується наступний алгоритм (Алгоритм 4.3)

- Алгоритм 4.3 Передача даних

1: **Якщо** (вузол і головний або резервний) **То**

- 2: Отримати ($ID_i, DataPCK$)// отримати дані від членів кластеру;
- 3: Обробити ($ID_i, DataPCK$)// обробити данні;
- 4: Передати на БС ($ID_i, DataPCK$)// передати дані на БС;
- 5: **Інакше**
- 6: **Якщо** (дані вузла знаходяться в діапазоні інтересу) **То**
- 7: Передати на CH & $sub-CH$ ($ID_i, DataPCK$);// передача даних на CH і $sub-CH$
- 8: **Інакше**
- 9: Стан сну (i)= $TRUE$;// вузол i в стані сну
- 10: **Кінець якщо**
- 11: **Кінець якщо**
- 12: //Раунд завершено

На рисунку 4.5 представлена блок-схема передачі даних для розробленого алгоритму.

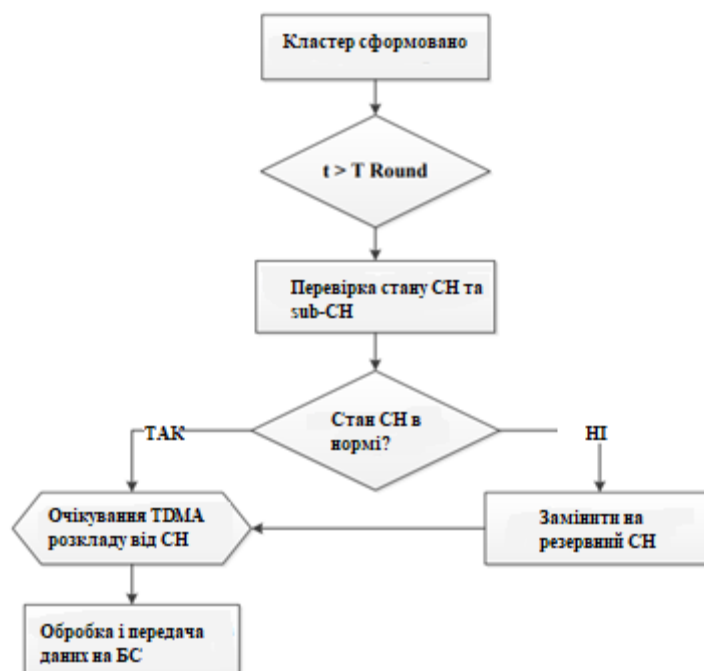


Рис. 4.5 Блок-схема передачі даних для розробленого алгоритму

4.4. Результати моделювання

Для порівняння характеристик розробленого алгоритму *FT-TEEN* з оригінальним алгоритмом *TEEN* було виконано метод дослідження об'єктів пізнання в середовищі *MATLAB*. Метод дослідження об'єктів пізнання (моделювання)

проводили для тих самих вихідних даних, які зазвичай прийняті для алгоритмів *TEEN* і *LEACH* [76, 93]. Алгоритм порівнювався з кількістю пакетів, успішно переданих між учасниками кластера і головним вузлом, а також між головним вузлом і базовою станцією. При моделюванні розглядалося пуассонівське поле зі 100 сенсорними вузлами площею 100м * 100м. Прогнозувалося, що опорна станція знаходиться за межами поля з координатами $x = 130$, $y = 50$. Розмір пакета даних був обраний величиною в 512, а число кадрів в кожному раунді 10. Інші параметри, які використовуються при моделюванні, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри і їх значення, використані при моделюванні

Параметр	Позначення	Значення
Первинна енергія на вузол	E	0,5j
Tx/Rx	E_{elec}	50nj/bit
Постійне підсилення	ϵ_{fs}	10pj/bit/m ²
Мультимережева стала	ϵ_{mp}	0,0013pj/bit/m ²
Втрати на ділянках (експоненціальні)	$\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}$	87
М'який поріг (Soft Threshold)	ST	2
Жорсткий поріг (Hard Threshold)	HD	100

На рисунку 4.6 і рисунку 4.7 показується кількість пакетів, успішно переданих від учасників кластера до головного вузла та від головного вузла до базової станції протягом одного раунду з імовірністю помилки 10%.

На рисунку 4.8 і рисунку 4.9 показується кількість пакетів, успішно переданих від учасників кластера до головного вузла та від головного вузла до базової станції протягом одного раунду з імовірністю помилки 20%.

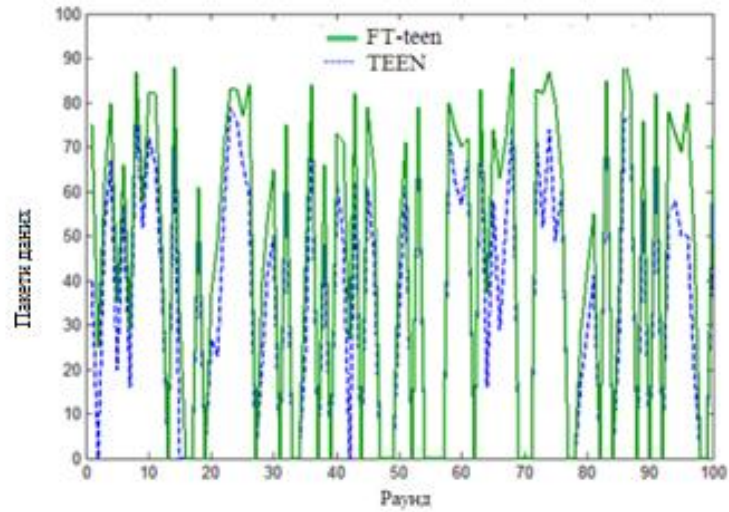


Рис. 4.6 Число успішно переданих пакетів від членів кластеру на *CH* (ймовірність помилки 10%)

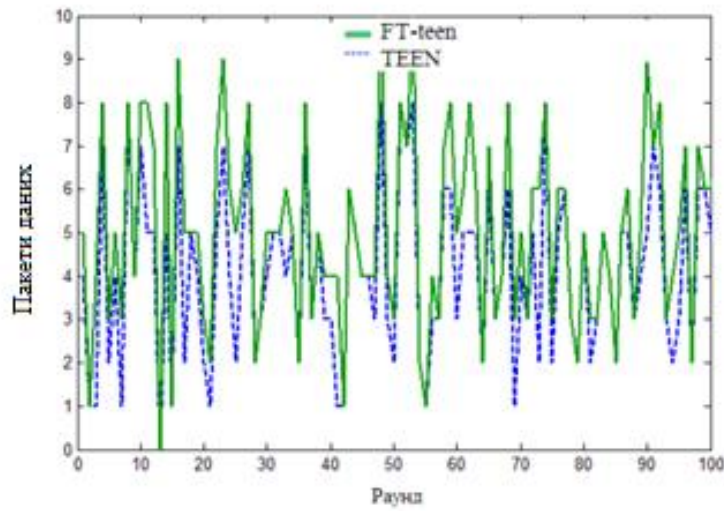


Рис. 4.7 Число успішно переданих пакетів від *CH* на базову станцію (ймовірність помилки 10%)

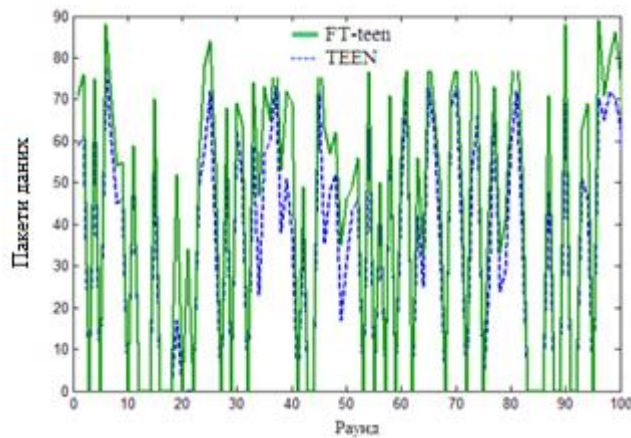


Рис. 4.8 Число успішно переданих пакетів від членів кластеру на *CH* (ймовірність помилки 20%)

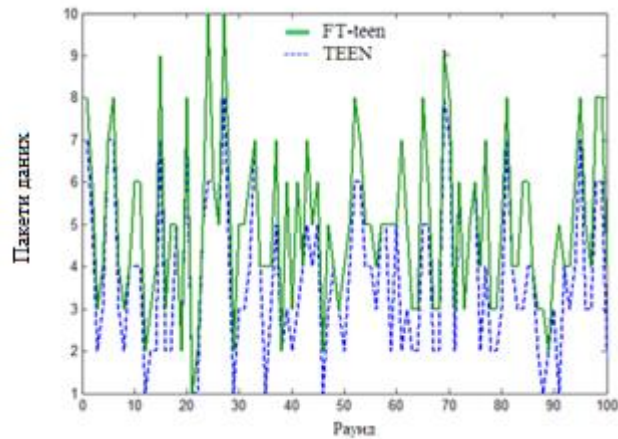


Рис. 4.9 Число успішно переданих пакетів від *CH* на базову станцію (ймовірність помилки 20%)

Аналіз результатів моделювання підтверджує, що підготовлений алгоритм забезпечує збільшення кількості успішно переданих пакетів від учасників кластеру до каналу *CH*, і від *CH* до базової станції порівняно з алгоритмом *TEEN*. Водночас, чим вище ймовірність помилки, тим більша кількість успішно переданих пакетів для розробленого алгоритму порівняно з алгоритмом *TEEN*.

На рисунку 4.10 і рисунку 4.11 зображено кількість пакетів успішно переданих від членів кластера на головний вузол і від головного вузла на базову станцію відповідно в продовж життєвого циклу сенсорної мережі при різних ймовірностях помилки.

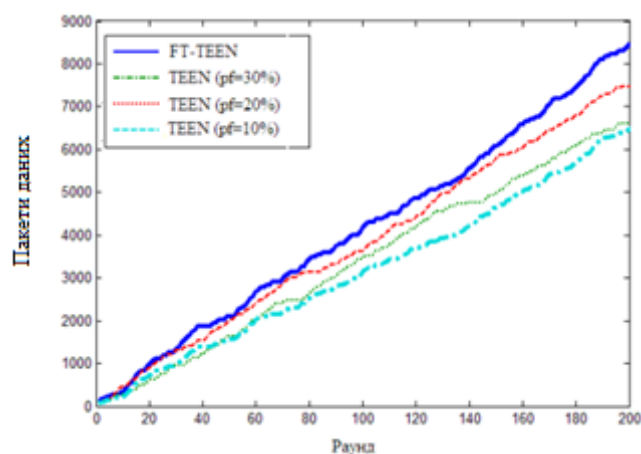


Рис. 4.10 Кількість пакетів успішно переданих від членів кластеру на *CH*

Як бачимо, і в тому, і в іншому випадку число успішно переданих пакетів для розробленого алгоритму істотно більше, ніж для базового алгоритму *TEEN*. Крім

того, розроблений алгоритм *FT-TEEN* забезпечує толерантність до значення ймовірності помилки, в той час як для базового алгоритму *TEEN* число успішно переданих пакетів істотно знижується з ростом ймовірності помилки в розглянутих межах.

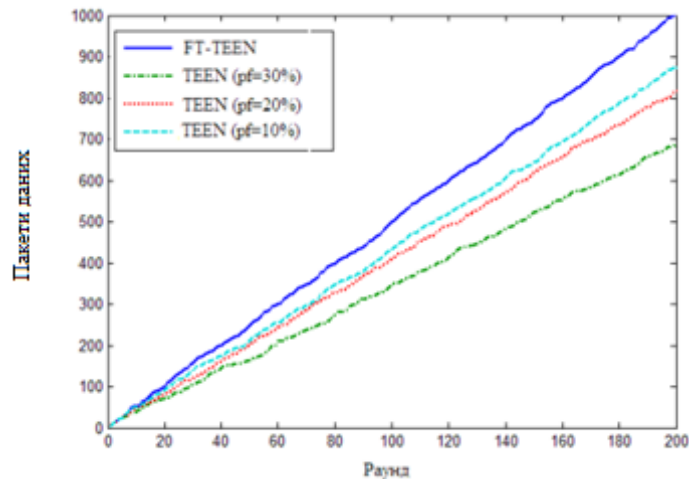


Рис. 4.11 Число успішно переданих пакетів від *CH* на базову станцію

Результати моделювання для всього життєвого циклу мережі зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2

Результати моделювання

Ймовірність помилки $P_f, \%$	<i>TEEN</i>		<i>FT-TEEN</i>		Частка поліпшення для переданих пакетів %	
	Без виявлення збоїв і відновлення, успішно передані пакети		З виявленням збоїв і відновленням, успішно передані пакети			
	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>
10	7500	876	8409	1005	12	15
20	6655	822	8409	1005	26	22
30	6405	692	8409	1005	31	45

Висновки

1. У розділі запропоновано новий відмовостійкий алгоритм, заснований на *LEACH*-подібному алгоритмі *TEEN*, що є найкращим з відомих алгоритмів кластеризації для БСМ зі стаціонарними вузлами.

2. Опрацьований алгоритм засвідчує збільшення кількості успішно переданих пакетів як від членів кластера до CH , так і від CH до базової станції порівняно з алгоритмом $TEEN$.

3. Розроблений алгоритм $FT-TEEN$ забезпечує толерантність до значення ймовірності помилки, в той час як для базового алгоритму $TEEN$ число успішно переданих пакетів істотно знижується з ростом ймовірності помилки в розглянутих межах.

РОЗДІЛ 5.

ПОКРИТТЯ, ЗВ'ЯЗНІСТЬ І ЩІЛЬНІСТЬ В ДВОВИМІРНИХ І ТРИВИМІРНИХ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

5.1. Огляд досліджень в предметній області

Хоча більшість існуючих робіт у сфері бездротових сенсорних мереж (БСМ) сьогодні присвячена двовимірному простору ($2D$), насправді такі мережі працюють в тривимірному просторі ($3D$), насамперед з появою нових додатків, таких як мережі датчиків польоту. Перехід від двовимірного простору до тривимірного створює ряд нових проблем через іншу топологію мережі. Потрібні нові підходи для оцінки таких характеристик БСМ, як покриття, зв'язність і щільність. Виходячи з вищесказаного, у цьому розділі ми зосереджуємось на характеристиках щільності та зв'язку для БСМ, щоб визначити таку стратегію розміщення сенсорних вузлів, щоб забезпечити принаймні 90% покриття для двовимірних ($2D$) і тривимірних ($3D$) БСМ. Тривалість життєвого циклу мережі, тривалість стабільності та пропускна здатність мережі також оцінюються на основі співвідношення між радіусом покриття (R_s) і радіусом дальності зв'язку (R_c). Результати можна використовувати для планування БСМ, бортових, тривимірних і літаючих сенсорних мереж.

За останні роки аналіз в області БСМ поступово переходять від вивчення властивостей на площині до моделей в тривимірному ($3D$) просторі [15, 24]. В [7] запропоновується нова сфера використання технологій БСМ - літаючі сенсорні мережі (ЛСМ). Прикладами додатків БСМ в тривимірному просторі крім ЛСМ також є контроль багатопверхових будівель, складських приміщень, підводний контроль тощо[22].

Перехід від моделей двовимірного простору до тривимірного складний процес, оскільки вирішення багатьох задач в $3D$ значно складніше, ніж в $2D$. Топологія мережі стає значно складнішою, що безпосередньо впливає на планування $3D$ БСМ.

Перш за все, вони включають: детерміновану або випадкову стратегію сенсорного розміщення, щільність сенсорного розміщення, зону покриття, якість

зв'язку, зв'язок між радіочастотою та відмінностями зв'язку. [33]. Збільшення зони покриття є фундаментальною вимогою для більшості додатків сенсорних мереж, наприклад, моніторингу [42], управління, стеження за метою [39].

На рисунку 5.1 представлено зображення сенсорних мереж в двовимірному і тривимірному просторі.

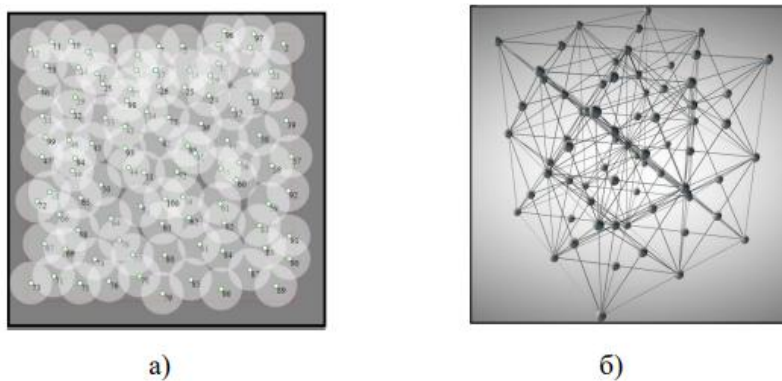


Рис. 5.1 БСМ в двовимірному і тривимірному просторі:

а – БСМ в $2D$; б – БСМ в $3D$

Зазначимо, що тривимірна мережа також представляється за допомогою безлічі двовимірних (див. рис. 5.2). Кожний тривимірний простір може бути розділений на n двовимірних площин, де $n \rightarrow \infty$.

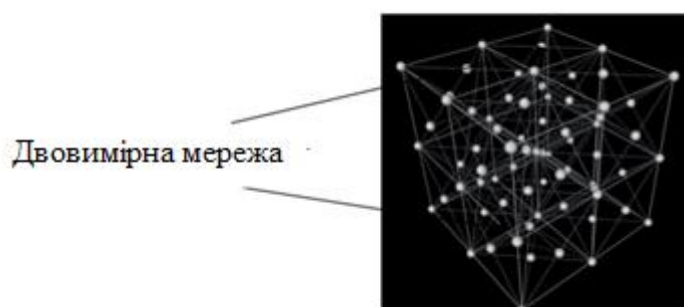


Рис. 5.2 Тривимірна мережа включає двовимірні мережі

Мета розділу - розробка методу розміщення БСМ, який може забезпечити 90% або більше покриття простору як для двовимірних, так і для тривимірних БСМ. Для цього потрібно дати відповіді на наступні запитання:

- яким повинні бути мінімальний радіус покриття (R_s) і щільність вузла датчика, щоб досягти покриття понад 90% для двовимірного та тривимірного БСМ?
- якою має бути щільність сенсорних вузлів, активних на даний момент, щоб гарантувати 90% покриття і повнозв'язної мережі?
- яким має бути відношення між радіусом покриття і дальністю зв'язку сенсорного вузла R_c / R_s для забезпечення таких заданих параметрів БСМ, як тривалість життєвого циклу, період стабільності і пропускну здатність мережі?

5.2. Стратегії розташування БСВ в двовимірному і тривимірному просторах

Сенсорні вузли можуть бути розташовані в просторі двома способами: детерміновано і випадково [32]. У детермінованих методах БСМ розташовуються лише в певних точках простору, розрахованого користувачем. Цей метод забезпечує повне охоплення простору продовж заданого часу в залежності від щільності сенсорних вузлів, методів їх кластеризації тощо. Однак існують області використання БСМ, в яких фіксоване (детерміноване) розташування вузлів недоцільне або навіть неможливе, скажімо, через високу щільність вузлів або їх розміщення у небезпечних середовищах. Тоді використання детермінованих методів неможливе, а випадкове розміщення може бути єдиною можливою стратегією.

У разі випадкового розміщення блоки датчиків розташовуються випадковим чином за допомогою літаків, інших мобільних пристроїв, замішування в бетоні тощо. З одного боку, необхідно якомога довше максимізувати покриття та зменшити енергоспоживання за рахунок мінімізації кількості активних вузлів, що виконують подібні завдання в межах свого діапазону. Останнє може бути реалізовано лише за умови відомої необхідної щільності сенсорних вузлів.

У програмах відстеження цілей мінімальна кількість вузлів, необхідних для повного покриття області, обумовлюється як деяке критичне значення щільності сенсорних вузлів, яке допускає виявити будь-який об'єкт, що перетинає розташування БСМ. Отже, для ефективного виявлення будь-якого простору, що

перетинає об'єкт, щільність БСМ повинна бути вище критичного значення (певний поріг щільності). [32].

5.3. Співвідношення між радіусом покриття сенсорного вузла, часткою покриття і щільністю в 2D і 3D БСМ

У розділі досліджується співвідношення між радіусом покриття R_s , часткою покриття C і щільністю сенсорних вузлів ρ в 2D і 3D БСМ в разі, коли сенсорні вузли розміщені випадковим чином.

5.3.1. Двовимірна БСМ

Припустимо, що n датчиків довільно розташовані в двовимірній площині і зона покриття датчика представляє з себе диск з радіусом R_s , площа якого:

$$S = \pi R_s^2 \quad (5.1)$$

Тоді щільність сенсорних вузлів становить $\rho = n / S$. Частка покриття, що визначається як відношення зони покриття A чи об'єму V до загальної площі або об'єму в момент часу $t > 0$ після розміщення датчиків, обчислюється за формулою [20]:

$$C = 1 - e^{-\rho S} \quad (5.2)$$

Формулу (5.2) можна бути використати при проектуванні БСМ для знаходження значення щільності, що потребується у БСМ.

Для звершення жаданої цільової зони покриття C ($0,9 \leq c \leq 1$) при $c \geq 0,99 \dots 0,90 \leftrightarrow \rho S \geq 4,6 \dots 2,3$ відповідно, необхідні щільності датчиків можна знайти таким способом:

$$c = 0,98 \leftrightarrow \rho S \geq 3,91; c = 0,97 \leftrightarrow \rho S \geq 3,50;$$

$$c = 0,96 \leftrightarrow \rho S \geq 3,21; c = 0,95 \leftrightarrow \rho S \geq 2,99;$$

$$c = 0,94 \leftrightarrow \rho S \geq 2,81; c = 0,93 \leftrightarrow \rho S \geq 2,66;$$

$$c = 0,92 \leftrightarrow \rho S \geq 2,53; c = 0,91 \leftrightarrow \rho S \geq 2,41;$$

$$c = 0,90 \leftrightarrow \rho S \geq 2,30.$$

В загальному необхідна щільність БСМ:

$$\rho = \frac{-\log(1-c)}{\pi r^2} \leftrightarrow R_S = \sqrt{\frac{-\log(1-c)}{\pi \rho}} = \sqrt{\frac{-\log(1-c)S}{\pi n}} \quad (5.3)$$

На рисунку 5.3 показані співвідношення між радіусом покриття, часткою покриття і щільністю розташування датчиків в плоскій, двовимірній БСМ для одержання представленої частки покриття.

Таблиця 5.1

Співвідношення між радіусом покриття R_S , часткою покриття C і щільністю ρ в 2D БСМ

$C\%$	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
$\rho * e^{-3}$										
$\rho_{(R_S=50m)}$	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
$\rho_{(R_S=45m)}$	0,8	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=40m)}$	0,9	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=35m)}$	0,9	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=30m)}$	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=25m)}$	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=20m)}$	1	1	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=15m)}$	1	1,1	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=10m)}$	1,1	1,2	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
$\rho_{(R_S=5m)}$	1,9	1,3	1	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3

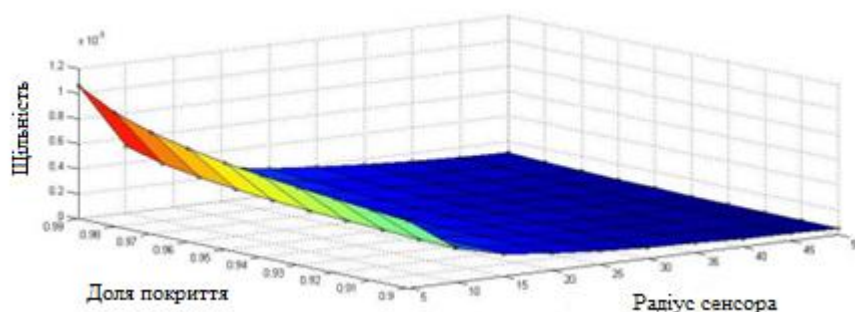


Рис. 5.3 Співвідношення між радіусом покриття R_S , часткою покриття C і щільністю ρ в 2D БСМ

5.3.2. Тривимірний БСМ

Сенсорні вузли $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, випадковим чином розподілені в тривимірній області V . Кожний сенсорний вузол $S_i, i = 1 \dots n$, має координати (x_i, y_i, z_i) в об'ємі V і радіус покриття. Таким чином, зона покриття для S_i може бути представлена сферою з центром в (x_i, y_i, z_i) і радіусом:

$$V_S = \frac{4}{3}\pi R_S^3 \quad (5.4)$$

Число БСВ, розташованих в об'ємі V , буде складати

$$n = V * \rho \quad (5.5)$$

$$\text{де } \rho \cong \frac{n}{V_S}$$

Доля покриття C визначається аналогічно (5.2):

$$C = 1 - e^{-\rho V_S} \quad (5.6)$$

Для досягнення бажаної цільової зони покриття $C(0,9 \leq c \leq 1)$ при $c \geq 0,99 \dots 0,90 \leftrightarrow \rho S \geq 4,6 \dots 2,3$ відповідно, необхідні щільності сенсорних вузлів можуть бути визначені наступним чином:

$$c = 0,98 \leftrightarrow \rho S \geq 3,91; c = 0,97 \leftrightarrow \rho S \geq 3,50;$$

$$c = 0,96 \leftrightarrow \rho S \geq 3,21; c = 0,95 \leftrightarrow \rho S \geq 2,99;$$

$$c = 0,94 \leftrightarrow \rho S \geq 2,81; c = 0,93 \leftrightarrow \rho S \geq 2,66;$$

$$c = 0,92 \leftrightarrow \rho S \geq 2,53; c = 0,91 \leftrightarrow \rho S \geq 2,41;$$

$$c = 0,90 \leftrightarrow \rho S \geq 2,30.$$

Щільність датчиків вираховується так само, як вказано вище. У поширеному для всіх випадку необхідна щільність БСМ:

$$\rho = \frac{-\log(1-c)}{\frac{4}{3}\pi R_S^3} \leftrightarrow R_S = \left[\frac{-\log(1-c)}{\frac{4}{3}\pi \rho} \right]^{1/3} = \left[\frac{-\log(1-c) V_S}{\frac{4}{3}\pi n} \right]^{1/3}, \quad (5.7)$$

де C – частка покриття, ρ – щільність, R_S – радіус зони покриття сенсорним вузлом.

На рисунку 5.4 наведені співвідношення між радіусом покриття R_S , часткою покриття і щільністю розташування сенсорних вузлів в тривимірній БСМ для

одержання заданої частки покриття. На рисунку 5.5 представлені порівняльні характеристики для двовимірної і тривимірної БСМ.

Таблиця 5.2

Співвідношення між радіусом покриття R_S , часткою покриття C і щільністю ρ в 3D БСМ

$C\%$ $\rho * e^{-3}$	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
$\rho_{(R_S=50m)}$	1,3	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
$\rho_{(R_S=45m)}$	1,3	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=40m)}$	1,6	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=35m)}$	1,7	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=30m)}$	1,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=25m)}$	1,9	0,9	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=20m)}$	2	1	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=15m)}$	2,2	1,1	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
$\rho_{(R_S=10m)}$	2,5	1,2	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
$\rho_{(R_S=5m)}$	2,9	1,3	1	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3

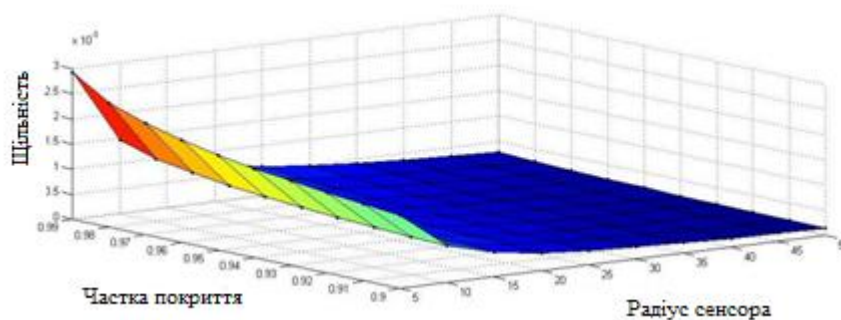


Рис. 5.4 Співвідношення між радіусом покриття R_S , часткою покриття C і щільністю ρ в 3D БСМ

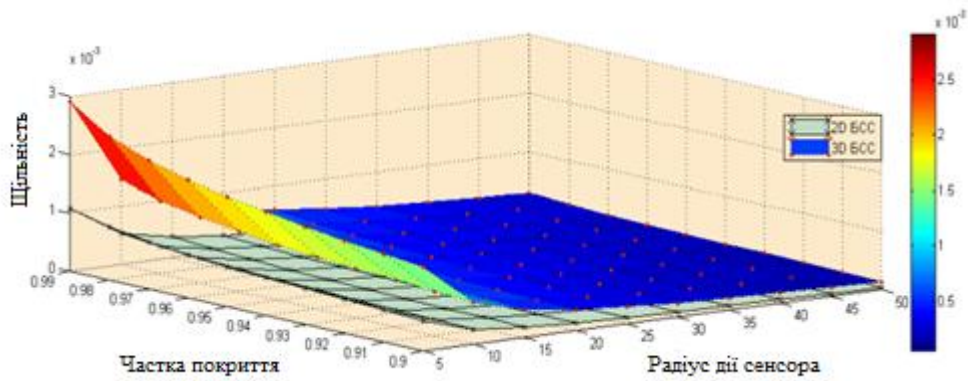


Рис. 5.5 Порівняльні характеристики для 2D і 3D БСМ

Як видно з рисунків 5.3, 5.4, 5.5 розмір площі датчика має певний вплив на необхідну щільність БСМ для забезпечення заданого співвідношення покриття. При інших обставинах, щільність сенсорних вузлів для тривимірних БСМ повинна бути вищою, ніж для двовимірних. На рис. 5.6 показані значення частки покриття як функції щільності ρ для 2D і 3D БСМ при $R_s = 30\text{м}$.

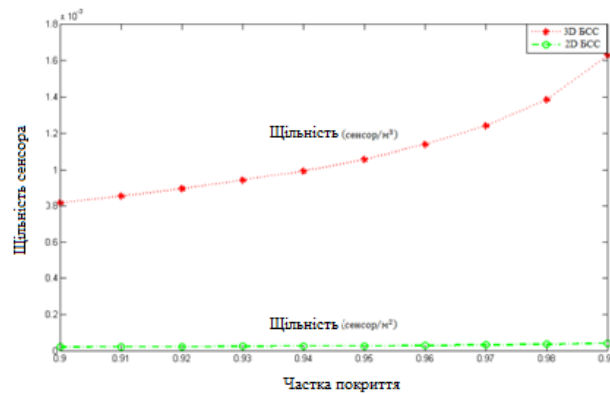


Рис. 5.6 Частка покриття C як функція щільності ρ в 2D та 3D БСМ при $R_s = 30\text{м}$

На рисунку 5.7 розглянуто порівняння кількості сусідніх вузлів, тобто вузлів, розташованих на відстані менше $2R_s$ для двовимірної і тривимірної БСМ. Оскільки необхідна щільність сенсорних вузлів для забезпечення заданого покриття для тривимірної набагато вища, ніж для двовимірної БСМ, кількість сусідніх вузлів для тривимірної БСМ також набагато вище, ніж для двовимірної.

Щоб отримати коефіцієнт покриття з імовірністю $C \geq 0,99$, щільність має бути $\rho \geq \frac{4,6}{V_s}$. Зона покриття вузла датчика буде перетинатися з зонами покриття всіх вузлів, на віддалені менше $2R_s$ і тоді в середньому число таких вузлів буде

$\rho * \left(\frac{4}{3}\pi(2R_S)^3\right) = 2^3 * \rho V_S \geq 4,6 * 2^3 \approx 37$ у тривимірній. Потрібне значення у двовимірній становитиме ≈ 18 . Так само для інших величин.

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 3,912 \approx 32 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 16$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 3,500 \approx 28 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 14$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 3,210 \approx 26 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 13$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,995 \approx 24 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 12$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,813 \approx 23 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 11$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,660 \approx 22 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 11$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,526 \approx 21 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 10$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,408 \approx 20 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 10$$

$$2^3 * \rho V_S \geq 2^3 * 2,300 \approx 19 \text{ в } 3D, \text{ в } 2D \approx 9$$

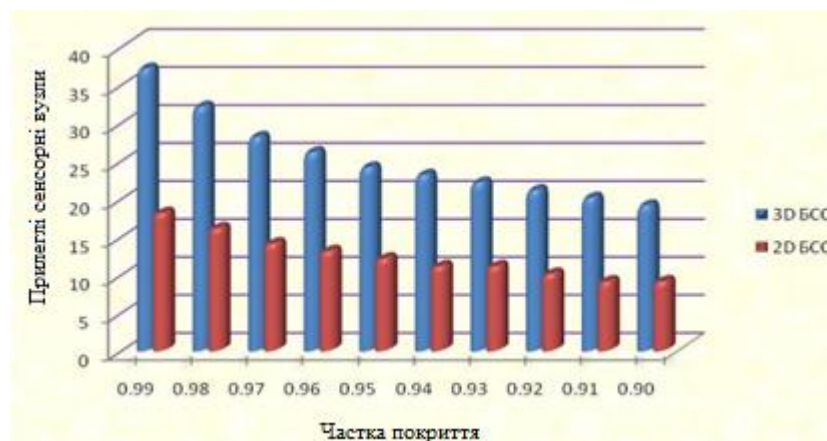


Рис. 5.7 Співвідношення між часткою покриття C і числом прилеглих сенсорних вузлів, що знаходяться на відстані менше $2R_S$, при випадковому розміщенні вузлів для $2D$ і $3D$ БСМ

5.4. Зв'язність мережі

Зв'язність зумовлює можливість взаємодії між будь-якими датчиками в мережі.

Множину прилеглих до сенсорного вузла сенсорів виразимо так $N(s_i)$.

Тоді $N(s_i)$ визначається з наступного рівняння:

$$N(s_i) = \{s_j : d(s_i, s_j) < r_i\} \quad (5.8)$$

На рисунку 5.8 зв'язність зображується зеленими лініями між сенсорними вузлами.

Для з'єднувань в БСМ важливо, щоб кожен з них знайшов маршрут для передачі даних на базову станцію. Два датчика пов'язані, якщо вони можуть передавати та отримувати дані один від одного безпосередньо або через транзитні з'єднання через інші сенсорні вузли. Усі БСМ одразу мають однаковий діапазон зв'язку, зона зв'язку для кожного вузла може бути представлена як диск для $2D$ БСМ або область для $3D$.

Критичний радіус для зв'язності в одноранговій мережі було розглянуто в [38], а для багатокрокових мереж в [37].

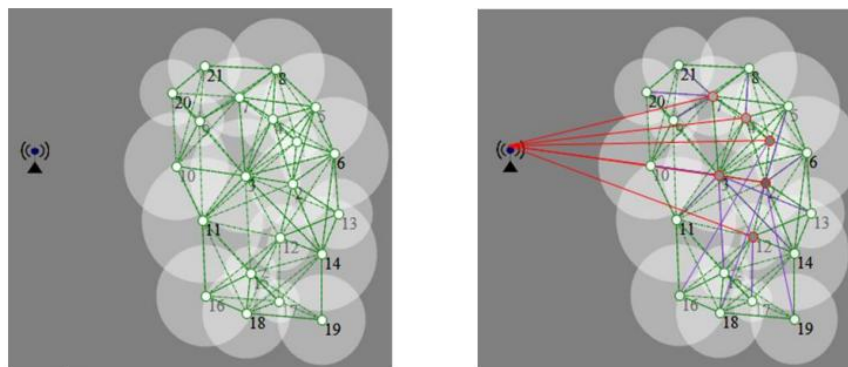


Рис. 5.8 Зв'язність БСВ

Для n датчиків, розташованих у різному порядку в одиничному $[0,1]^d$, критичний радіус зв'язності для забезпечення повнозв'язної мережі має вигляд $O\left(\left(\frac{\log n}{n}\right)^{1/d}\right)$ [37].

Якщо $n = 1000$, то критичний радіус зв'язності в двовимірній БСМ приблизно дорівнює 0,07, а в $3D$ БСМ дорівнює 0,2. Це значить, що при рівномірному випадковому розміщенні БСМ в $3D$ просторі для повнозв'язної мережі потрібна вища щільність БСВ [29]. При цьому необхідний для $3D$ БСМ радіус зв'язку набагато більше ніж для $2D$.

5.5. Співвідношення між радіусом покриття і дальністю зв'язку

Відношення між радіусом покриття і радіусом зв'язку R_c / R_s є дуже важливим фактором забезпечення безперервного функціонування БСМ до виходу з ладу останнього БСМ. Для того щоб вивчити вплив R_c / R_s на продуктивність і срок

існування мережі розберемо можливі співвідношення між радіусом покриття і радіусом зв'язку для двохвимірної БСМ:

- радіус зв'язку, що найменш, в два рази більше радіусу покриття $R_C \geq 2R_S$;
- $R_C = R_S = 30\text{м}$;
- $R_C < R_S$.

Для аналізу і порівняння зазначених варіантів проводилося моделювання з використанням *C#* і *VB.NET*. Аналіз продуктивності мережі (період стабільності, довгостроковість функціонування і отриманих даних на базовій станції, що знаходиться віддалено від мережі) на основі співвідношення R_C/R_S .

Модель мережі представлена у вигляді 200 датчиків, які розташовано на ділянці розмірністю 0,4 км * 0,4 км. Висунуто припущення, що БС фіксована і знаходиться на координатах (150м, 150м), які не включаються в мережу, датчик працює з точно визначеною швидкістю передачі і протягом всього часу функціонування володіє інформацією для транспортування на БС.

Таблиця 5.3

Вплив відношення R_C/R_S на продуктивність мережі

Відношення R_C/R_S	Перший вузол вийшов з ладу	40% вузлів виходять з ладу за n раундів	Число прийнятих пакетів
$R_C \geq 2R_S$	140	1200	1525
$R_C = R_S$	70	460	790
$R_C < R_S$	67	370	770

Переглянемо таблицю 5.3, 4/10 датчиків у другій і третій ситуаціях відмовляють швидше, ніж в першій ситуації. Але мережі все одно функціонують, адже є покриття і зв'язність між датчиками. Отже БСМ ще володіє потрібним запасом енергії для функціонування. Питання стоїть в тому, щоб всі датчики були з'єднані між собою і відповісти на це питання може введення допоміжна БС.

Рис. 5. 9 демонструє переривання з'єднань між датчиками. БС дає можливість забезпечити союз між датчиками по сплину конкретного періоду, коли продуктивність мережі впаде до відповідного рівня, і використовувати наступне відношення R_C/R_S .

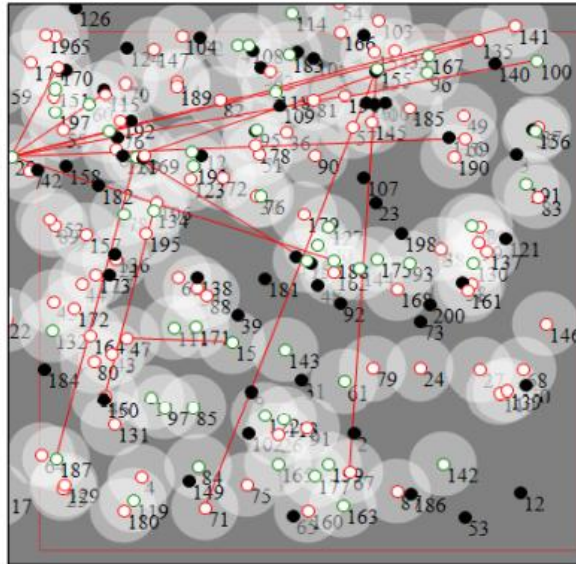


Рис. 5.9 Втрати з'єднання між вузлами

Як видно з продуктів моделювання, для гарантії потрібної зв'язності між датчиками радіус зв'язку має бути, як мінімум, вдвічі більший за радіус покриття в двовимірних БСМ.

Відома велика кількість способів для розташування датчиків у тривимірних БСМ, такі як, шестикутник, додекаедр або октаедр. Для куба вона рівна $2R_S/\sqrt{3}$, радіус зв'язку має бути не менш $1,547R_S$ [33].

Висновки

1. Розроблено методику розміщення сенсорних вузлів в двовимірному і тривимірному просторах, що забезпечує, принаймні, 90% покриття простору в залежності від співвідношення щільності розміщення і радіусу дії датчика R_S .

2. Довжина та ширина сенсорного поля мають значний вплив на потрібну щільність БСВ для надання заданої частки покриття. При цьому для тривимірних БСМ необхідна щільність БСВ більше, ніж для двовимірних. З величиною кількості прилеглих вузлів для тривимірних БСМ та двовимірних БСМ ситуація аналогічна.

3. При рівномірному випадковому розміщенні БСВ в тривимірному просторі щільність БСВ має перебувати на високому рівні, а радіус зв'язку для тривимірної БСМ буде істотно переважати радіус зв'язку для двовимірної БСМ.

4. Щоб гаранувати потрібний параметр зв'язності між датчиками діапазон зв'язку має відповідати значенню, вдвічі більшому за радіуса покриття в двовимірних БСМ.

5. У випадку представлення тривимірних БСМ відома велика кількість способів для розташування датчиків, найвідоміші це - шестикутна призма, додекаедр або октаедр. Для куба, де відстань між будь-якими двома сусідніми вузлами становить $2R_S/\sqrt{3}$ радіус зв'язку має бути не менш $1,547R_S$.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Шоста частина дисертації представляє економічний аналіз перспектив введення розглянутих методів розвитку маршрутизації в бездротових сенсорних мережах на основі застосування адаптивного алгоритму кластеризації.

6.1. Опис ідеї стартап проекту

Вектор данного проекту очікує підвищення продуктивності маршрутизації в відомих бездротових сенсорних мережах для здобуття вищих показників ефективності систем, диверсифікації витрат енергії датчиків та запобіганню можливих втрат через збою сенсорів.

Таблиця 6.1.
Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Алгоритм маршрутизації FT-TEEN в безпроводових сенсорних мережах	<ol style="list-style-type: none">1. Передача інформації на БС тільки за допомогою участі датчиків-лідерів.2. Покращення значень доступності та масштабованості системи.	Оператори БСМ матимуть можливість звести до мінімум кількість втраті на обчислювальні ресурси без негативного впливу на якість послуг, які надаються користувачам. Система збільшить свої розміри та зменшить втрати ресурсів.

Таблиця 6.2.

Технологічна здійсненність проекту

No п/п	Ідея проекту	Методи реалізації	Можливості реалізації	Доступність реалізації
1	У запропонованом у алгоритмі кластеризації мобільний датчик назначає себе датчиком-	Реалізація у беспроводовій сенсорній мережі	Беспроводні сенсорні вузли, БС	Є доступним
2	лідером кластера базуєчись на значення простого точкового предиктора <i>SPP</i> (<i>Single Point Predictor</i>) для комбінованого критерію прогнозування	Реалізація у мобільних сенсорних мережах	Наявність мобільних сенсорних вузлів, БС	Є доступним
Обрана технологія реалізації проекту: <i>Fault-Tolerance Threshold-sensitive Energy Efficient Network algorithm</i>				

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг мого стартапу у порівнянні з вже відомими пропозиціями, які пропонують конкуренти:

- а) визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї стартап- проекту;

- б) визначення ринку та існуючих конкурентів на ньому, збір інформації щодо техніко-економічних показників для власного стартапу і конкуруючих проектів;
- в) проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначені показники, що мають:
- 1) гірші значення (слабкі - W);
 - 2) кращі значення (сильні S).

Таблиця 6.3

Визначення сильних та слабких характеристик

	Потенційні товари/концепції конкурентів	
	Мій проект	«Адаптивний алгоритм кластеризації» у протоколі FT-TEEN
W слабка сторона	Керування у кластері відбувається за допомогою головного вузла, який для керування використовує велику кількість енергії	Стабільність роботи мережі та енергоефективність
S Сильна сторона	Масштабованість мережі	Відмовостійкість мережі не залежно від розміру моделі мережі

6.2. Аналіз можливостей ринку

Під час спостереження за можливостями ринку, спочатку було проаналізовано попит: наявність попиту, динаміку розвитку ринку і його обсяг. Результати досліджень нижче.

Таблиця 6.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характер стану
1	Передача даних в бездротових сенсорних мережах (якісна оцінка)	Йде на зріст постійно
2	Загальнодоступні для обрання алгоритми маршрутизації в БСМ	Розвиток похилий
3	Наявність обмежень для входу	Відсутня
4	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Відсутні

Після проведення аналізу сьогодишньої необхідності ринку рішень стосовно покращення показників ефективності маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, за зазначеним вище оцінюванням ринок викликає інтерес для входження.

Таблиця 6.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Недостатня довжина життєвого циклу сенсорної мережі при використанні існуючих алгоритмів маршрутизації	Багатий асортимент застосунків: дослідження довкілля недосяжного для людини, охоронні системи і т.д.	Самостійна установка формату провайдером. Юридичні особи мають особливі привілеї у вигляді додаткових можливостях.	Поліпшення щабелю наданих послуг. Зменшення втрат за рахунок більш ефективної передачі даних та більш енергоефективної системи.

Таблиця 6.6.

Фактори загроз

No п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Дефіцит інтересу у продукті	Успіх застосування пропонованого методу залежить від готовності модифікації власних технологій, адже будь-які зміни можуть привести до неочікуваних впливів в роботі мережі, в тому числі і зі знаком мінус. Низька популярність кінцевого рішення серед користувачів БСМ.	Глобальне тестування пертурбацій з фідбеком від користувачів.
2	Складність технічної реалізації	Введення даних технологій в існуючих бездротових мережах ускладнено через технічні складності	Ітеративне впровадження компонентів модифікованої системи, узгодження плану розробки і релізу з розробниками.

Висновки

В даному розділі приведені можливості використання методу маршрутизації в БСМ *FT-TEEN*, заснованого на адаптивному алгоритмі кластеризації, на ринок бездротових сенсорних мереж та якісна оцінка перспектив ринкового впровадження даного методу. Конкурентна ситуація на ринку дозволяє розглянути запропоноване рішення як більш енергоефективне та стабільне в роботі.

Існуючі рішення-аналоги не створюють прямої конкуренції на ринку, оскільки вирішують поставлену задачу лише частково. Основною

проблемою є ймовірна складність розробки готового рішення на основі наведених методів.

Проведений аналіз підтверджує, що подальша імплементація проекту є доцільною.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Дослідження, проведені в роботі, дозволили отримати наступні основні результати:

1. Аналіз сучасного стану в області досліджень БСМ, визначення передових параметрів і організації бездротових сенсорних мереж демонструють саморегулюючий характер, виняткові умови з енергетичної ефективності, енергоефективність і значна кількість датчиків в БСМ потребують розробки специфічних алгоритмів маршрутизації для бездротових сенсорних мереж.

2. Аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації, самоорганізації і вибору головного датчика-лідера в бездротових сенсорних мережах демонструє, що необхідне опрацювання сучасних ефективних алгоритмів кластеризації для мобільних і відмовостійких бездротових сенсорних мереж.

3. Ретельне дослідження алгоритмів *DT*, *LEACH*, *SEP*, *DEEC*, *TEEN* демонструє що *LEACH* алгоритм - вкрай ефективний протокол для гомогенних БСМ. Даний алгоритм сприяє зменшенню енерговитрати у 7 разів, якщо порівнювати з прямою співдією датчиків, а алгоритм *TEEN* переважає за тривалістю періоду стабільності і залишкової енергії всі згадані технології і рекомендується до використання як в гомогенних, так і в гетерогенних БСМ.

4. На основі поєднання кращих властивостей двох відомих існуючих алгоритмів - *DCA* і *MBC*, опрацьований адаптивний алгоритм кластеризації для БСМ з рухомими датчиками *MACA* (*Mobility Adaptive Clustering Algorithm*).

5. У розробленому алгоритмі кластеризації рухомий датчик назначає себе датчиком-лідером кластера на основі простого точкового предиктора *SPP* (*Single Point Predictor*) для комбінованого критерію прогнозування (алгоритм *DCA*). Інші датчиками є членами кластера, що визначаються на основі деякого значення, що вказує на їх придатність для підключення до конкретного головного вузлу (алгоритм *MBC*).

6. Порівняння запропонованого в роботі алгоритму *MACA* на основі моделювання в системі *C#.NET* показало, що розроблений алгоритм по тривалості життєвого циклу набагато перевершує алгоритм *DCA*, який, в свою чергу, істотно перевершує *LEACH-M*. Алгоритм *MACA* перевершує алгоритм *DCA*

також за тривалістю періоду стабільності, а по числу успішно переданих пакетів обидва алгоритму приблизно рівні.

7. На основі ієрархічного алгоритму кластеризації *TEEN* розроблений відмовостійкий алгоритм кластеризації для БСМ *FT-TEEN*.

8. Розроблений алгоритм забезпечує збільшення числа успішно переданих пакетів як від членів кластера до *CH*, так і від *CH* до базової станції в порівнянні з алгоритмом *TEEN*.

9. Розроблений алгоритм *FT-TEEN* забезпечує толерантність до значення ймовірності помилки, в той час як для базового алгоритму *TEEN* число успішно переданих пакетів істотно знижується з ростом ймовірності помилки в розглянутих межах.

10. Параметри сенсорного поля має ключовий вплив на щільність, що потребується для БСВ для забезпечення заданої частки покриття. При цьому для тривимірних БСМ необхідна щільність БСВ більше, ніж для двовимірних. Число прилеглих вузлів для об'ємних БСМ також значимо більше, ніж для плоских БСМ. При плануванні БСМ розроблена методика розташування датчиків, що гарантує покриття, принаймні, 9/10 датчиків для двовимірних і тривимірних БСМ.

11. Для забезпечення необхідної зв'язності між датчиками дальність \ зв'язку має бути вдвічі більшою радіуса покриття в двовимірних БСМ.

12. У об'ємних БСМ є велика кількість варіацій для розташування датчиків, наприклад, шестикутна призма, додекаедр або октаедр. Для куба, де відстань між будь-якими двома сусідніми вузлами становить $2R_S/\sqrt{3}$ радіус зв'язку має бути не менш $1,547R_S$.

СПИСОК ВИКОРАСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абакумов П. А. Алгоритм кластеризации для мобильных беспроводных сенсорных сетей в трехмерном пространстве/ П. А. Абакумов, А.Е.Кучерявый // Электросвязь, №9, 2015.
2. Аль-Кадами Н. А. Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами / Н. А. Аль-Кадами, А. Е. Кучерявый // Электросвязь, №3, 2015.
3. Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными импульсными радиосигналами. – Киев, Наукова Думка, 2012.
4. Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М.Ю.Ільченка, С.О.Кравчука: монографія. - Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019.- 336 с. Рекомендовано до друку ВР КПІ ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2.
5. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008.-328с.,іл.
6. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Наукова думка, 2017. – 730 с.
7. Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: НПП "Издательство "Наукова думка", НАН Украины", 2008. – 580 с.
8. Кучерявый А. Е. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек // Электросвязь, №9, 2015.
9. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей / А.Е. Кучерявый // Электросвязь, №1, 2013.
10. Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новиков В.І., Тачинінв 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

11. 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.
12. 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 г. ISBN 978-954-2995-29-6.
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. М.З.Згуровський, М.Ю.Ільченко, Є.А.Якорнов. Організація наукових досліджень в галузі телекомунікацій. – К.: Хімджест, 2018. – 336 с.
15. Мочалов В.А. Построение отказоустойчивой структуры беспроводной сенсорной сети с учетом отказов центров сбора информации / В.А. Мочалов, Е.Н. Турута // Труды IS&IT' 12. Научное издание в 4-х томах. М., Физматлит, 2012., т.2.
16. 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
17. Основи теорії телекомунікацій / Підручник / За заг. ред. проф. Ільченка М.Ю. – К.: 2010. – ІССЗІ НТУУ «КПІ» – с.786, іл.
18. 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» / КПІ 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 : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 107 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36935>)

19. РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Штойко О.О., Лисенко О. І. ПТ-2021: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – с. 307-309.
20. Штойко А. А., Петрова В. Н. Развитие алгоритмов маршрутизации в мобильных сенсорных сетях. Наукові праці Другої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 19 грудня 2019 р. (Київ, Україна). – К. : НУХТ, 2019. – С. 315-319. ISBN 978-83-956296-0-0(Польща)
21. Штойко А.А., Петрова В.Н. Развитие алгоритмов маршрутизации в мобильных сенсорных сетях. XIV Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 295-297.
22. Штойко А. А., Петрова В. Н. Усовершенствованные алгоритмы маршрутизации в сенсорных сетях с мобильными элементами. Проблеми інформатизації: Матеріали п'ятнадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 9 – 10 квітня 2020 року. - Київ : НАУ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ; Білорусь: БДАЗ, 2020. – С. 123-124
23. Штойко А. А. , Петрова В. Н. Алгоритмы маршрутизации для сенсорных сетей с мобильными элементами. V - Міжнародна науково-практична конференція «Відкриті еволююючі системи», 19 - 21 травня 2020 р, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського . - С.134-137.
24. Al-Qadami N. Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes / N. Al-Qadami, I. Laila, A. Koucheryavy, A.S. Ahmad // ICACT-2015, Proceedings, 1-3 July, Phoenix Park, Korea.
25. Antoine Bagula, Application of Wireless Sensor Networks, A Talk Presented at WSN Applications, UCT, February 2012.

26. Antonio J. Extending the internet of things to the future internet through IPv6 support / J. Jara Antonio, Varakliotis Socrates, F. Antonio, Gmez- Skarmeta, T. Kirstein Peter // J. Mobile Inf. Syst. 10 (1) (2014) 3-17 pp.
27. Arati. M. A. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks / M Arati., and. P. A. Dharma., // in Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium, pp. 20092015, San Francisco, Calif, USA, April 2001.
28. Bellalouna M. A priori methods for fault tolerance in wireless sensor networks," / M. Bellalouna; A. Ghabri // Computer and Information Technology (WCCIT), 2013 World Congress on, vol., no., pp.16, 22-24 June 2013.
29. Boulanouar I. Energy-aware object tracking algorithm using heterogeneous Wireless Sensor Networks / I. Boulanouar, A Rachedi., Stéphane Lohier, Gilles. Roussel // in: 4th IFIP/IEEE WD'2011, Ontario, Canada, October 2011.
30. Compare of Routing Algorithms for Homogeneous and Heterogeneous Wireless Sensor Networks / N.A. Al-Kadami // (TELECOM IT) - УДК. 621.391, С. 4-22 (2014).
31. Culler D. Overview of sensor networks / D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava // IEEE J. Comput.Soc. 37 (8) (2004) 41-49.
32. Doo-Soon Park. Fault Tolerance and Energy Consumption Scheme of a Wireless Sensor Network / International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2013, Article ID 396850, 7 pp.
33. Ghosha A. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: a survey / A. Ghosha, S.K. Dasb, // J. PMC 4 (3) (2008) 303-334.
34. Goel A. and Rai S., Krishnamachari B. Sharp thresholds for monotone properties in random geometric graphs / Annals of Applied Probability. - 2006.
35. Hai Liu. Fault-Tolerant Algorithms/Protocols in Wireless Sensor Networks / Liu. Hai, Amiya. Nayak and Stojmenovi Ivan // Chapter 10 Guide to Wireless Sensor Networks, Computer Communications 261 and Networks, DOI: 10.1007/978-1-84882-218-410, Springer-Verlag London Limited 2009.

36. Heintzelman W. Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks / W. Heintzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA, Jan. 2000.
37. Hill J.L. System Architecture for Wireless Sensor Networks / J.L. Hill // University of California, Berkeley, Spring 2003.
38. Hla Yin M. Fault Management Using Cluster-Based Protocol in Wireless Sensor Networks / Yin M. Hla, Z. Win // International Journal of Future Computer and Communication vol. 2, 2014, no. 6, pp. 36-39.
39. Kim D. Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Network / D. Kim and Y. Chung // Proceedings of the First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences, Volume 2, 2006.
40. Li D. Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks / D. Li, K. Wong, Y.H. Hu, A. M. Sayeed // IEEE Signal Processing Magazine. - Mar. 2002. - 19(2).
41. Lopez P. Survey of Internet of Things Technologies for Clinical Environments / P. Lopez, D. Fernandez, A.J. Jara, A.F. Skarmeta, // AINA Workshops, 2013, pp. 1349-1354 pp.
42. Luis M.L. Routing and mobility approaches in IPv6 over LoWPAN mesh networks / M.L. Oliveira Luis, F. Amaro, Sousa de, J.P.C. Rodrigues Joel // IJCS 24 (11) (2011) 1445-1466 pp.
43. May M. Design of a Wireless Sensor Node Platform / M. May // University of Waikato. - 2012.
44. Meenakshi Panda. Energy Efficient Distributed Fault Identification Algorithm in Wireless Sensor Networks / Panda Meenakshi and P. M. Khilar // Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2014 (2014), Article ID 323754, 16 pp.
45. Misra S. Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks / S. Misra, K. Manikonda, M. C. Obaidat //

- Kharagpur, India, Department of Computer Science, Monmouth University, New Jersey, USA. — 2011.
46. Nazrul Alam S. M. Coverage and Connectivity in Three-Dimensional Networks / Alam S. M. Nazrul, Z. J. Haas // Cornell University, MobiCom'06, Los Angeles, California, USA. - September 23-29. - 2006.
 47. Prasanna S. An Overview of Wireless Sensor Networks Applications and Security / S. Prasanna, S. Rao // IJSCE, vol-2(2), May 2012, ISSN: 2231-2307 pp.
 48. Nuno R. Mobility support in Low Power Wireless Personal Area Networks (MLoWPAN) / R Nuno., da. M Silva // Coimbra University, Portugal, 2010.
 49. Radwan A. A. A Study of Critical Transmission Range for Connectivity in Ad Hoc Network / A. A. Radwan, M. H. Mohamed, M. A. Mofaddel, H.H. El-Sayed // Minia University, Assiut University, Sohag University, Egypt. - 1 May 2013.
 50. Recommendation ITU-T Y.2052. Framework of multi-homing in IPv6- based NGN. Geneva, February 2008.
 51. Römer K. The design space of wireless sensor networks / K. Römer, F. Mattern // IEEE Wireless Commun. 11 (6) (2004) 54-61.
 52. Stankovic J.A. Realistic applications for wireless sensor networks / J.A. Stankovic, A.D. Wood, T. He // Theoretical Comput. Sci. (2011) 835-863.
 53. Stankovic Stanislava. Medical applications based on Wireless Sensor Networks / Stanislava Stankovic // Trans. J. Int. Res. 5 (2) (2009) 19-23.
 54. Varshney P. Distributed Detection and Data Fusion / P. Varshney // Springer-Verlag. New York, NY. - 1996.
 55. Welsh M. Wireless sensor networks for emergency Medical Care / M. Welsh, D. Malan, B. T. Duncan // Harvard and Boston Universities, A Talk Presented at GE Global Research, March 2004.
 56. Zach Shelby. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet/ Shelby Zach, Bormann Carsten // Book, IETF (6LoWPAN-WG), 2009.