ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:
«Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації і радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми _Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Ігор ТОРОШАНКО
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач вищої освіти гр.ТСДМ-61
Ігор ТОРОШАНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Оксана ВАРФОЛОМЕЄВА,
науковий ступінь, вчене звання к.т.н, доцент

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент:
науковий ступінь, вчене звання _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій
Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 172 Телекомунікації і радіотехніка
Освітньо-професійна програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою ТСМ
_____Віктор ЗАЇКА
«____» _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Торошанко Ігор Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1.Тема кваліфікаційної роботи: Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж
керівник кваліфікаційної роботи Оксана ВАРФОЛОМЕЄВА, к.т.н, доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» жовтня 2025 р. № 467

Строк подання кваліфікаційної роботи «20» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
– Безпроводові сенсорні мережі та їх робота в динамічних умовах.
– Мобільні агенти для збору, обробки та передачі даних.
– Ad Hoc / Mesh-топології та науково-технічна література з питань побудови сенсорних мереж.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Загальні принципи побудови безпроводових сенсорних мереж у динамічних середовищах.
2. Роль мобільних агентів та алгоритми їх роботи в сенсорних мережах.
3. Методи організації збору даних мобільними агентами.
4. Практична реалізація та моделювання процесів збору даних у мережах з мобільними агентами.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання: «3» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обробка теоретичної частини	02.09–10.09.2025	
2	Написання 1 розділу	11.09–24.09.2025	
3	Написання 2 розділу	25.09–10.10.2025	
4	Написання 3 розділу	11.10–30.10.2025	
5	Написання 4 розділу	31.10–20.11.2025	
6	Оформлення випусконої роботи, обгрунтування результатів дослідження	21.11–15.12.2025	
7	Підготовка демонстраційних матеріалів	16.12–20.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Ігор ТОРОШАНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник
кваліфікаційної роботи _____ Оксана ВАРФОЛОМЕЄВА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавр: 76 стор., 16 рис., 8 табл., 31 джерело.

Мета роботи — розробка алгоритму автоматизованого збору та обробки даних у динамічних середовищах сенсорних мереж із використанням мобільних агентів.

Об`єкт дослідження — процеси функціонування безпроводових сенсорних мереж у змінних умовах середовища.

Предмет дослідження — механізми збору даних мобільними агентами в динамічних сенсорних мережах.

Методи дослідження – теорія передавання даних, системний аналіз, методи моделювання сенсорних мереж, порівняльний аналіз алгоритмів, теорія ймовірностей і математична статистика.

Короткий зміст роботи: У роботі проаналізовано особливості динамічних сенсорних мереж та можливості застосування мобільних агентів для збору даних. Розглянуто принципи роботи агентів, їх переваги у змінних умовах та здатність зменшувати навантаження на мережу. Розроблено алгоритм автоматизованого збору й обробки вимірювань, що забезпечує підвищення точності даних і ефективності роботи сенсорної мережі.

Галузь використання — системи моніторингу довкілля, розумні міста, промислові та технологічні мережі збору даних, медичні та безпекові системи, інтелектуальні вимірювальні комплекси.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СЕНСОРНА МЕРЕЖА, МОБІЛЬНИЙ АГЕНТ, ДИНАМІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ЗБІР ДАНИХ, ОБРОБКА ВИМІРЮВАНЬ, АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА.

ABSTRACT

Text part of the bachelor level qualification work: 76 pages., 16 figures., 8 tables., 31 source.

Purpose - to develop an algorithm for automated data collection and processing in dynamic sensor network environments using mobile agents.

Object of research - the functioning processes of wireless sensor networks under changing environmental conditions.

Subject of research - data collection mechanisms implemented by mobile agents in dynamic sensor networks.

Research methods - data transmission theory, systems analysis, sensor network modeling methods, comparative analysis of algorithms, probability theory, and mathematical statistics.

Summary of the work: The thesis analyzes the features of dynamic sensor networks and explores the potential of mobile agents for data collection. The principles of mobile agent operation, their advantages in variable network conditions, and their ability to reduce communication load are examined. An algorithm for automated data collection and measurement processing has been developed, ensuring improved data accuracy and increased efficiency of the sensor network.

Applications: environmental monitoring systems, smart city infrastructures, industrial and technological data collection networks, medical and security systems, and intelligent measurement complexes.

KEYWORDS: SENSOR NETWORK, MOBILE AGENT, DYNAMIC ENVIRONMENT, DATA COLLECTION, MEASUREMENT PROCESSING, ADAPTIVE ALGORITHM, INFORMATION SYSTEM.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється здобувач Торошанко І.І. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації і радіотехніка
(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

на тему: «Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач виконав актуальне науково-практичне дослідження, присвячене використанню мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах безпроводових сенсорних мереж. У роботі обґрунтовано доцільність застосування агентного підходу в умовах змінної топології та обмежених ресурсів сенсорних вузлів, а також запропоновано ефективні методи оптимізації процесів збору та обробки даних.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Торошанка І.І. на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з телекомунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Оксана ВАРФОЛОМЕЄВА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*
"___" _____20__ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач *Торошанко І.І.* допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Торошанка Ігоря Івановича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему: «Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж»

Актуальність.
Кваліфікаційна робота Торошанка Ігоря Івановича на тему «Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж» є актуальною, оскільки сучасні сенсорні системи все частіше працюють у змінних умовах, де традиційні методи збору даних виявляються недостатньо ефективними. Використання мобільних агентів дозволяє підвищити гнучкість мережі, зменшити навантаження на канали зв'язку та забезпечити більш точне й оперативне отримання інформації. Такий підхід є важливим для подальшого розвитку телекомунікаційних технологій і систем моніторингу.

Позитивні сторони.
1. Проведено якісний аналіз особливостей динамічних сенсорних мереж та сучасних підходів до збору даних.
2. Запропоновано ефективний метод використання мобільних агентів, що демонструє практичну цінність роботи.
3.Результати моделювання підтверджують працездатність і доцільність запропонованого рішення.

Недоліки.
1. У ряді розділів бажано більш детально представити математичні моделі та принципи роботи алгоритмів.
2. Робота могла б містити ширше порівняння з іншими методами збору даних для повнішої оцінки переваг підходу.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи бакалаврської.

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Торошанко Ігор Іванович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з телекомунікацій та радіотехніки.*

Рецензент: _____ _____
науковий ступінь, вчене звання *підпис* *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

ЗМІСТ

ВСТУП……....10
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ……..…….....12
1.1 Призначення та структура безпроводових сенсорних мереж ……12
1.2 Принципи функціонування сенсорних вузлів у динамічному середовищі…16
1.3 Архітектура та технологія Ad-Hoc у сенсорних мережах……....20
1.4 Особливості маршрутизації та енергозбереження в динамічних мережах…25
РОЗДІЛ 2 МОБІЛЬНІ АГЕНТИ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ …….29
2.1 Поняття мобільного агента та принципи його функціонування ……29
2.2 Ролі мобільних агентів у зборі та передачі даних.……...35
2.3 Алгоритми міграції та маршрутизації мобільних агентів ……..…….40
2.4 Переваги використання мобільних агентів у динамічних мережах ……...44
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗБОРУ ДАНИХ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ……...47
3.1 Постановка задачі збору даних у змінних умовах середовища ……..47
3.2 Моделі взаємодії вузлів та мобільних агентів……..52
3.3 Адаптивні методи маршрутизації та передачі даних ……..58
3.4 Алгоритми узгодження і калібрування даних……..63
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ З МОБІЛЬНИМИ АГЕНТАМИ ……...69
4.1 Архітектура системи збору даних з мобільними агентами……..69
4.2 Імітаційне моделювання процесів у динамічному середовищі ……..74
4.3 Оцінка ефективності та надійності збору даних …….....78
ВИСНОВКИ……...…….83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……...……85
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ(презентація)……89

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

1. БСМ — безпроводова сенсорна мережа.
2. WSN (Wireless Sensor Network) — безпроводова сенсорна мережа.
3. Ad-Hoc — децентралізована безпроводова мережа без фіксованої інфраструктури.
4. Mesh — безпроводова мережа з багатозв’язною самоорганізованою топологією.
5. AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) — протокол маршрутизації за вимогою.
6. DSR (Dynamic Source Routing) — протокол динамічної маршрутизації з використанням маршрутів від джерела.IDS - системі виявлення вторгнень.
7. OLSR (Optimized Link State Routing) - оптимізований протокол маршрутизації на основі стану каналів.

ВСТУП

Актуальність теми: Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних сенсорних мережах стає дедалі актуальнішим завдяки їх здатності ефективно працювати в умовах змінної топології та обмежених ресурсів. Такий підхід має широкий спектр застосувань у сучасних телекомунікаційних, промислових та науково-дослідних системах.

Мета і завдання дослідження: Мета роботи полягає у дослідженні, розробці та аналізі методів автоматизованого збору та обробки вимірювань у динамічних сенсорних мережах із застосуванням мобільних агентів.

Завдання **дослідження включають:**

- Проведення огляду сучасних безпроводових сенсорних мереж та їх особливостей у динамічних умовах.
- Дослідження підходів і засобів збору та зберігання даних у сенсорних мережах зі змінною топологією.
- Вибір ефективних методів організації збору інформації із застосуванням мобільних агентів.
- Дослідження алгоритму роботи мобільних агентів для збору та попередньої обробки даних у динамічному середовищі.
- Оцінка ефективності запропонованого алгоритму збору даних.

Об'єкт дослідження: процеси збору даних у динамічних сенсорних мережах із використанням мобільних агентів.

Предмет дослідження: сенсорна мережа з мобільними агентами, зокрема її структура, механізми збору даних та алгоритми їх подальшої обробки.

Методи дослідження**:** у роботі застосовано комплекс наукових методів, зокрема:

- Теорія передачі даних: для аналізу особливостей обміну інформацією в динамічних сенсорних мережах з мобільними агентами.
- Системний аналіз: для формування архітектури мережі та структурних компонентів механізму збору даних.
- Методи моделювання: для перевірки роботи мобільних агентів і оцінки їх ефективності за різних умов функціонування мережі.
- Порівняльний аналіз: для визначення переваг запропонованих методів збору даних у порівнянні з існуючими підходами.
- Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики: для обробки вимірювань і оцінювання їх достовірності в умовах змінного середовища.

Наукова новизна: полягає у розробці адаптивного підходу до збору даних у динамічних сенсорних мережах із використанням мобільних агентів, що забезпечує більш ефективну взаємодію між вузлами мережі та алгоритмами обробки інформації. Запропоновані методи дозволяють зменшити навантаження на мережу, підвищити точність та узгодженість вимірювань, а також оптимізувати енергоспоживання сенсорних вузлів у змінних умовах середовища.

Апробація :

1. Boiko Liudmyla, Varfolomeeva Oksana, Kis Oleksandr, Toroshanko Ihor. Design Wireless Sensor Networks Using Mobile Agents. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2024. – №1. – С. 216-221.

2. Toroshanko Ihor, Toroshanko Andrii. Methods for Recognizing Traffic Signatures and Protocols. VI Міжнародна наукова конференція «Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії», 4 квітня 2025 року, ХНУ. – С. 144-147.

3. Варфоломеєва О.Г., Домрачева К.О., Торошанко І.І. Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж. Наукоємні технології. – 2026. – №1 (прийнято до друку).

1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Призначення та структура безпроводових сенсорних мереж

Загальні положення. Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) являють собою розподілені телекомунікаційні системи, що складаються з великої кількості автономних сенсорних вузлів, розгорнутих у контрольованій зоні з метою збирання, обробки та передачі інформації. Завдяки мініатюризації електронних компонентів та розвитку бездротових технологій БСМ набули широкого застосування у сферах екологічного моніторингу, охорони довкілля, інтелектуальних транспортних систем, промислової діагностики та військового призначення (Рис. 1.1)[1].

Порівняно з традиційними дротовими системами, сенсорні мережі мають низку переваг: автономність, простоту розгортання, масштабованість та здатність працювати у важкодоступних місцях. Особливо важливою є можливість функціонування без централізованої інфраструктури, що дозволяє застосовувати БСМ у динамічних середовищах, де топологія мережі може змінюватися внаслідок переміщення вузлів, перешкод або відмов обладнання.

У таких умовах одним із перспективних напрямів є використання мобільних агентів — програмних сутностей, що можуть переміщуватися мережею та виконувати локальну обробку даних. Мобільні агенти зменшують навантаження на мережевий трафік, підвищують енергоефективність і забезпечують адаптивність мережі до змінних умов [6].

Призначення безпроводових сенсорних мереж. Безпроводові сенсорні мережі призначені для автономного збору, передавання та аналізу даних про стан об’єктів і навколишнього середовища. Завдяки можливості працювати без фіксованої інфраструктури та підтримувати самоорганізацію, такі мережі забезпечують

моніторинг у складних або динамічних умовах, де традиційні системи є малоефективними.

Основними завданнями БСМ є:

- моніторинг параметрів навколишнього середовища;
- спостереження за рухомими об’єктами;
- контроль технічного стану споруд і машин;
- оперативне виявлення небезпечних подій;
- передача агрегованих даних у пункт обробки;
- підтримка прийняття рішень у реальному часі [7].

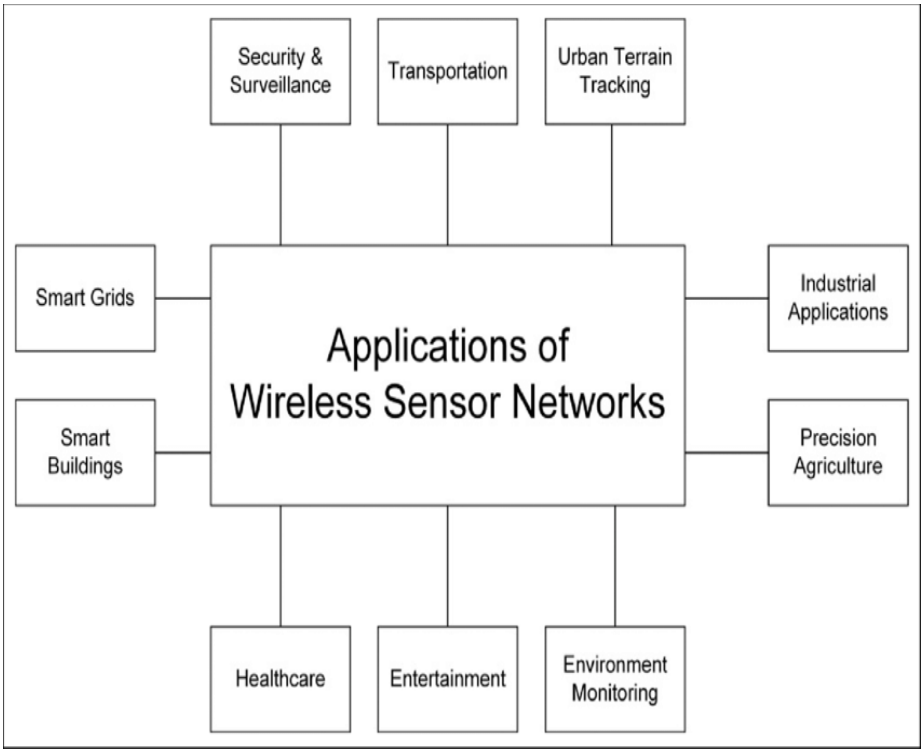


Рис. 1.1 – Основні сфери застосування безпроводових сенсорних мереж [6]

Структура безпроводової сенсорної мережі. Будь-яка БСМ складається з великої кількості сенсорних вузлів, що взаємодіють між собою та передають дані до центрального пункту або мобільних агентів (Рис. 1.2). Типовий сенсорний вузол включає декілька функціональних компонентів (Табл. 1.1):

– сенсорний модуль;

– мікроконтролер або процесор;

– радіомодуль;

– пам’ять;

– автономне джерело живлення.

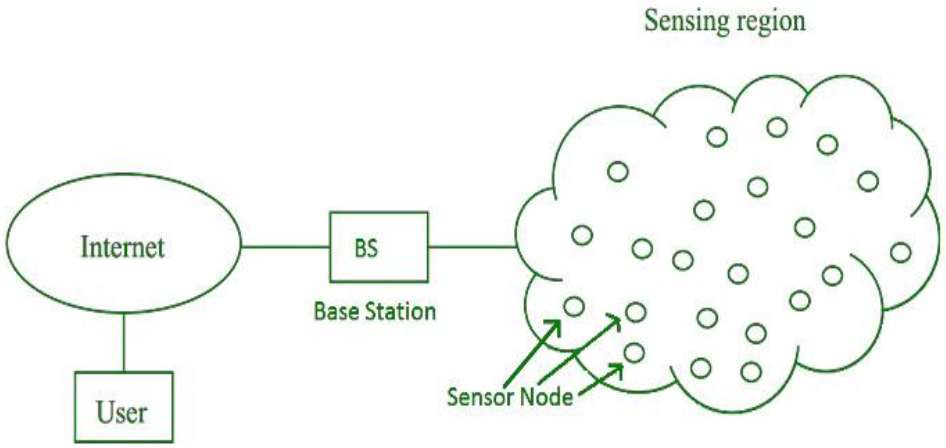


Рис. 1.2 – Основні компоненти сенсорного вузла БСМ [3]

Сенсорні вузли можуть об’єднуватися в різні типи топологій: плоску, кластерну, mesh-структуру або ієрархічну модель. Плоскі мережі є простими у розгортанні, однак мають обмежені можливості масштабування. Кластерні структури дозволяють зменшити навантаження на мережу за рахунок використання головних вузлів, які виконують локальну агрегацію даних.

Mesh-топології забезпечують наявність кількох альтернативних маршрутів, що значно підвищує відмовостійкість та сприяє автоматичному відновленню зв’язку при зміні умов середовища. Ієрархічні моделі поєднують переваги кластеризації та багаторівневої маршрутизації, що робить їх ефективними для великих та енергокритичних систем [2].

В умовах динамічного середовища найбільш результативними є саме ієрархічні та mesh-топології, оскільки вони забезпечують гнучке переналаштування маршрутів, стійкість до відмов вузлів і стабільність роботи мережі навіть за постійних змін її структури.

Таблиця 1.1 Функціональні елементи сенсорного вузла [10]

Елемент вузла	Призначення	Особливості у динамічних умовах
Сенсор	Вимірювання параметрів середовища	Впливає на точність системи; потребує калібрування
Мікроконтролер	Обробка даних, підтримка мобільних агентів	Забезпечує фільтрацію та агрегацію
Радіомодуль	Передача даних між вузлами	Визначає дальність і завадостійкість
Пам’ять	Зберігання вимірювань	Дозволяє агентам працювати автономно
Джерело живлення	Живлення вузла	Визначає тривалість життя мережі

Особливості функціонування WSN *у динамічних умовах.* У динамічному середовищі робота сенсорних мереж ускладнюється зміною топології, нестабільністю каналів зв’язку, асинхронністю вимірювань та зношуванням енергоресурсів вузлів. Зважаючи на ці фактори, особливо важливими є адаптивні механізми маршрутизації, локальної обробки даних та підтримання узгодженості інформації. Мережа має забезпечувати безперервність роботи навіть у випадках часткових відмов або втрати зв’язку між вузлами.

Роль мобільних агентів у структурі БСМ. Мобільні агенти здатні автономно переміщуватися мережею, виконувати локальну обробку вимірювань, проводити фільтрацію даних та зменшувати обсяг переданого трафіку. Завдяки цьому значно знижується навантаження на мережеві канали та оптимізується енергоспоживання. В умовах динамічних змін мобільні агенти забезпечують адаптацію мережі, своєчасне оновлення даних і підвищення достовірності обробки інформації [21].

Проблеми та виклики побудови БСМ. До ключових проблем належать обмежена енергоємність вузлів, нестабільність радіоканалів, ризик втрати даних через відмови обладнання, дрейф параметрів сенсорів та складність забезпечення синхронності вимірювань. Ці фактори вимагають застосування інтелектуальних методів оптимізації, серед яких використання мобільних агентів є одним із найбільш перспективних рішень[16].

1.2 Принципи функціонування сенсорних вузлів у динамічному середовищі

У динамічних сенсорних мережах робота окремих вузлів визначається здатністю системи адаптуватися до змін топології, стану каналу зв'язку та доступності ресурсів. Функціонування сенсорного вузла базується на тісній взаємодії його апаратних і програмних компонентів, а також на можливості виконувати вимірювання, локальну обробку даних, передачу інформації та підтримку маршрутизації в умовах обмежених енергетичних ресурсів. Узагальнену структуру та принцип роботи сенсорного вузла (зображено на Рис. 1.3) [15].

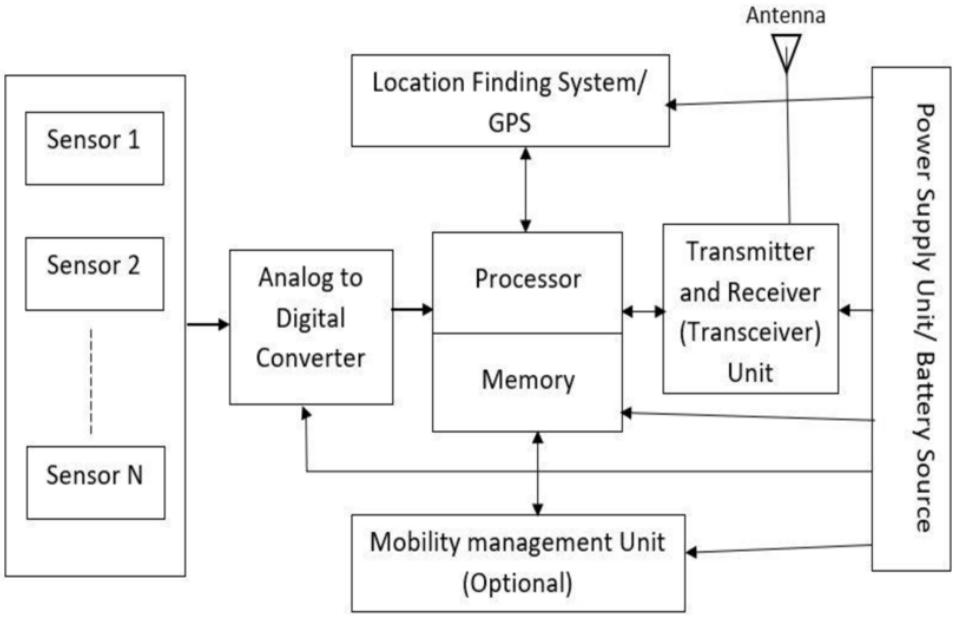


Рис. 1.3 - Принципи функціонування сенсорного вузла у динамічному середовищі [15]

Ключовим принципом роботи сенсорного вузла є автономність, яка передбачає виконання повного циклу обробки — від вимірювання до формування локальних рішень — без постійної участі центрального контролера. Завдяки цьому мережа зберігає стійкість навіть у випадках, коли її топологія змінюється, а окремі вузли тимчасово втрачають зв’язок.

Важливою характеристикою є самоорганізація, що реалізується шляхом автоматичного вибору сусідніх вузлів, оновлення таблиць маршрутизації та налаштування параметрів радіомодуля відповідно до умов середовища. Сенсорні вузли періодично обмінюються службовими повідомленнями, оцінюють якість каналу, визначають доступні маршрути та прогнозують можливі зміни топології [14].

Принцип енергоефективності є визначальним, адже більшість вузлів працює від автономних джерел живлення. Для зниження енергоспоживання застосовуються режими сну, адаптивні інтервали активності, зменшення частоти передачі даних та перенесення частини обчислень на локальний рівень. У цьому контексті особливо корисними є мобільні агенти, здатні переміщуватися між вузлами та виконувати обробку інформації без постійного використання каналу зв’язку.

Не менш суттєвим є принцип адаптивності, який дозволяє сенсорному вузлу змінювати свою поведінку залежно від рівня завад, щільності вузлів, появи нових об’єктів або виходу з ладу існуючих елементів мережі. Це забезпечує коректну передачу даних і підтримку стабільної роботи навіть у разі швидких змін навколишніх умов [13].

Сенсорний вузол повинен також забезпечувати достовірність і узгодженість вимірювань. Через вплив шумів, температурних коливань та дрейф параметрів сенсорів виникає необхідність застосування фільтрації, калібрування та методів корекції даних. Мобільні агенти можуть порівнювати вимірювання кількох вузлів, виявляти аномалії та підвищувати точність отриманої інформації.

Ще одним важливим принципом є стійкість до відмов, що передбачає використання надлишкових маршрутів, механізмів локального відновлення зв’язку та

дублювання критично важливих даних. Завдяки цьому мережа продовжує функціонувати навіть за умови втрати окремих вузлів або тимчасового погіршення якості каналу.

Таким чином, принципи функціонування сенсорних вузлів у динамічному середовищі ґрунтуються на автономності, самоорганізації, адаптивності, енергоефективності та надійності роботи. Використання мобільних агентів підсилює ці властивості, забезпечуючи більш ефективний збір, обробку та доставку даних у складних умовах.

Важливу роль у функціонуванні сенсорного вузла відіграє взаємодія між програмним забезпеченням та апаратною частиною. Програмна складова відповідає за керування режимами роботи вузла, планування вимірювань, обробку отриманих даних і прийняття рішень щодо передачі інформації. У динамічному середовищі програмне забезпечення повинно забезпечувати швидке реагування на зміну умов, зокрема шляхом перебудови алгоритмів маршрутизації та корекції параметрів передавання [13].

Одним із ключових аспектів є асинхронність роботи сенсорних вузлів. Через різний рівень заряду джерел живлення, неоднакові умови поширення радіосигналів та різну інтенсивність подій у зоні спостереження вузли можуть працювати в різних режимах активності. Це ускладнює координацію вимірювань і передачі даних, тому особливо важливими стають механізми узгодження та синхронізації, які можуть реалізовуватися як на рівні мережевих протоколів, так і за допомогою мобільних агентів.

У динамічних сенсорних мережах значну увагу приділяють управлінню трафіком. Передача кожного пакета даних супроводжується витратами енергії, тому сенсорний вузол повинен приймати рішення щодо доцільності передачі інформації, її обсягу та пріоритетності. Часто застосовуються методи локальної агрегації, коли дані кількох вимірювань об’єднуються або узагальнюються перед передаванням. Це дозволяє зменшити навантаження на мережу та продовжити час її функціонування.

Особливістю динамічного середовища є необхідність врахування мобільності як самих вузлів, так і об’єктів спостереження. У таких умовах сенсорний вузол повинен адаптувати частоту вимірювань і передачі даних відповідно до швидкості змін параметрів середовища. Наприклад, у разі виявлення різких змін контрольованої величини вузол може переходити у більш активний режим роботи, забезпечуючи підвищену деталізацію збору інформації [12].

Використання мобільних агентів дозволяє реалізувати більш гнучкі сценарії взаємодії між вузлами. Агент може переносити не лише дані, а й елементи логіки обробки, що дає змогу динамічно змінювати функціональність сенсорних вузлів без необхідності їх фізичного переналаштування. Це особливо актуально для великих мереж, де централізоване оновлення програмного забезпечення є складним або неможливим.

Крім того, сенсорні вузли в динамічному середовищі повинні забезпечувати базові механізми захисту інформації. Передавання даних у відкритому радіоканалі створює ризики несанкціонованого доступу або спотворення інформації. Тому на рівні вузла можуть застосовуватися методи автентифікації, шифрування та перевірки цілісності даних, при цьому мобільні агенти можуть виконувати роль додаткового контролю коректності отриманої інформації.

Крім того, сенсорні вузли в динамічному середовищі повинні забезпечувати базові механізми захисту інформації. Передавання даних у відкритому радіоканалі створює ризики несанкціонованого доступу або спотворення інформації. Тому на рівні вузла можуть застосовуватися методи автентифікації, шифрування та перевірки цілісності даних, при цьому мобільні агенти можуть виконувати роль додаткового контролю коректності отриманої інформації [11] .

1.3 Архітектура та технологія Ad-Hoc у сенсорних мережах

Технологія Ad-Hoc є основою побудови більшості безпроводових сенсорних мереж, що функціонують у динамічних середовищах. Її ключовою особливістю є відсутність фіксованої інфраструктури та централізованого керування, що дозволяє сенсорним вузлам самостійно формувати мережу, встановлювати з'єднання та забезпечувати передавання даних. У такій архітектурі кожен вузол може одночасно виконувати функції джерела даних, приймача та ретранслятора інформації.

Архітектура Ad-Hoc є фундаментальною основою для побудови безпроводових сенсорних мереж, особливо в умовах динамічних середовищ, де відсутня фіксована інфраструктура та централізоване керування. На відміну від традиційних мереж із базовими станціями, Ad-Hoc мережі (Рис.1.4) формуються безпосередньо за участі самих вузлів, які виконують роль як сенсорів і передавачів, так і маршрутизаторів. Завдяки цьому забезпечується можливість швидкого розгортання, масштабування та роботи в умовах постійної зміни топології [9].

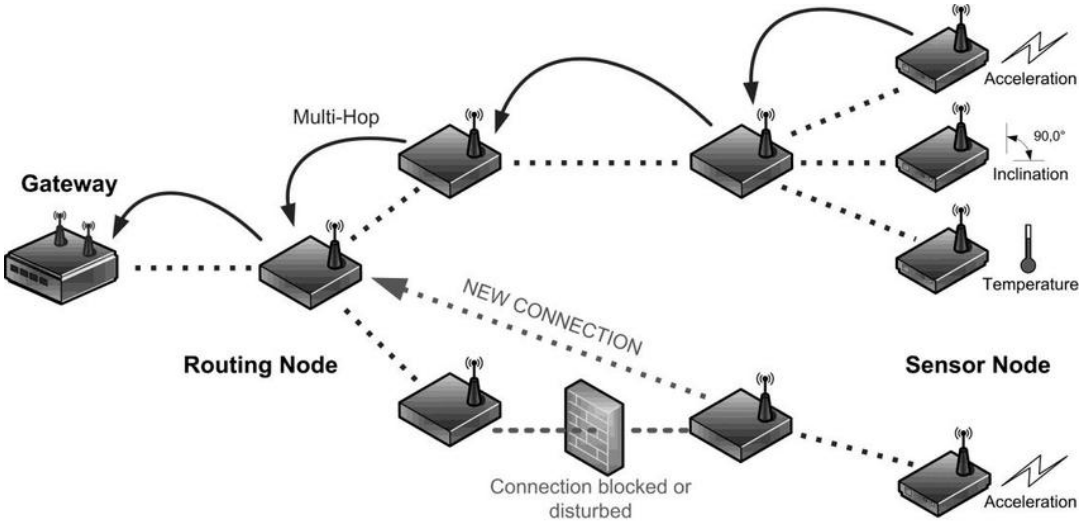


Рис. 1.4 - Архітектура Ad-Hoc мережі [9]

У безпроводових сенсорних мережах Ad-Hoc архітектура забезпечує високу гнучкість і масштабованість. Нові вузли можуть динамічно приєднуватися до мережі

без необхідності її перезапуску або переналаштування, а у разі виходу з ладу окремих елементів мережа здатна автоматично перебудовувати маршрути передачі даних. Це особливо важливо для систем, що працюють у складних або непередбачуваних умовах експлуатації.

Однією з ключових характеристик Ad-Hoc мереж є багатострибкова передача даних. Оскільки радіус дії окремого сенсорного вузла є обмеженим, інформація передається від вузла до вузла через проміжні елементи мережі. Такий підхід дозволяє охоплювати великі території без збільшення потужності передавачів, але водночас потребує ефективних алгоритмів маршрутизації та управління трафіком.

У контексті сенсорних мереж технологія Ad-Hoc інтегрується з принципами самоорганізації та адаптивної маршрутизації. Вузли можуть автоматично формувати локальні кластери, вибирати головні вузли або шлюзи та перебудовувати маршрути відповідно до поточних умов середовища. Це особливо важливо при роботі у динамічних зонах, де з’єднання між окремими сенсорами може швидко змінюватися через рух об’єктів, завади або зниження енергоресурсів [4].

У таких мережах широко застосовуються протоколи маршрутизації Ad-Hoc, серед яких найбільш поширеними є AODV, DSR, OLSR та їхні модифікації, адаптовані для безпроводових сенсорних мереж. Дані протоколи забезпечують побудову найкоротших або найстабільніших маршрутів з урахуванням параметрів мережі, таких як рівень сигналу, затримка передавання, втрати пакетів і доступність вузлів.

На відміну від традиційних мереж, маршрутизація в БСМ повинна обов’язково враховувати енергоспоживання кожного сенсорного вузла, оскільки його передчасне вимкнення може призвести до порушення зв’язності мережі або втрати важливої інформації. Тому сучасні протоколи маршрутизації для БСМ доповнюються механізмами енергоефективного вибору маршрутів та балансування навантаження [5].

Порівняльні характеристики найбільш поширених протоколів маршрутизації, що використовуються в безпроводових сенсорних мережах, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 Порівняння основних протоколів маршрутизації Ad-Hoc мереж [5]

Протокол	Тип маршрутизації	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
AODV	Реактивна	Мінімальний службовий трафік, маршрути створюються за потреби	Затримка при пошуку маршруту	Динамічні мережі зі змінною топологією
DSR	Реактивна	Не потребує таблиць маршрутизації, гнучка структура	Довгі заголовки пакетів, неефективний у великих мережах	Малі та середні БСМ
OLSR	Проактивна	Швидка передача даних, постійно оновлені маршрути	Велике службове навантаження	Великі та щільні сенсорні мережі
ZRP	Гібридна	Компроміс між реактивними та проактивними методами	Складність налаштування зон	Мережі середнього масштабу

Важливим аспектом архітектури Ad-Hoc є те, що сенсорні мережі можуть формувати ієрархічні структури, які підвищують ефективність обміну даними та зменшують обсяг службового трафіку. Головні вузли виконують агрегацію вимірювань, координують локальні маршрути та взаємодіють з мобільними агентами, які можуть здійснювати збір інформації по всій мережі. Це дозволяє мінімізувати кількість міжвузлових передач і знижує навантаження на радіоканал.

У динамічних умовах архітектура Ad-Hoc забезпечує переваги, яких неможливо досягти у стаціонарних мережах. Зокрема, вузли можуть:

- автономно змінювати роль (сенсор, ретранслятор, головний вузол);
- адаптувати рівень потужності передавача залежно від відстані до сусідів;
- відновлювати маршрути при втраті зв’язку або виході вузла з ладу;

- працювати у режимах низького енергоспоживання без втрати функціональності;
- взаємодіяти з мобільними агентами, які оптимізують збір та обробку даних [8].

Технологія Ad-Hoc стає особливо ефективною при використанні мобільних агентів, які можуть переміщуватися мережею і виконувати частину робіт, що у класичних мережах потребувала б постійної передачі даних через багато проміжних вузлів. Таким чином зменшується навантаження на мережевий трафік, підвищується надійність доставки інформації та зменшуються енергетичні витрати.

Загалом архітектура та технологія Ad-Hoc забезпечують основу для побудови гнучких, масштабованих і стійких сенсорних мереж, здатних до роботи в умовах змінної топології. Їхнє поєднання з мобільними агентами дозволяє створювати високоефективні системи збору й обробки інформації, що є критичним у багатьох сучасних телекомунікаційних та моніторингових задачах.

Важливою особливістю Ad-Hoc архітектури в сенсорних мережах є можливість інтеграції механізмів контекстної адаптації. Кожен сенсорний вузол може приймати рішення не лише на основі локальних параметрів, але й з урахуванням інформації про стан сусідніх вузлів, інтенсивність трафіку, рівень завад та залишковий енергоресурс. Такий підхід дозволяє мережі реагувати на зміни середовища в режимі реального часу та підтримувати оптимальні умови функціонування [8].

У поєднанні з мобільними агентами Ad-Hoc мережі набувають властивостей інтелектуальних розподілених систем. Мобільні агенти можуть аналізувати локальний стан мережі, визначати вузли з критичним рівнем енергії, прогнозувати можливі розриви зв’язку та змінювати власний маршрут міграції для мінімізації негативних наслідків. Це особливо актуально для великих сенсорних мереж, де централізований контроль є неефективним або неможливим.

Ще одним напрямом розвитку Ad-Hoc архітектури є використання крос-рівневих механізмів управління. У таких системах інформація з фізичного та канального рівнів (рівень сигналу, завади, помилки передачі) використовується на мережевому та прикладному рівнях для оптимізації маршрутизації та прийняття

рішень мобільними агентами. Це дозволяє підвищити якість обслуговування (QoS) та зменшити втрати даних у складних умовах.

Необхідно також відзначити, що Ad-Hoc архітектура сенсорних мереж створює передумови для підвищення інформаційної безпеки. За рахунок відсутності єдиного центру керування зменшується ризик критичних відмов, а мобільні агенти можуть виконувати функції моніторингу аномальної активності, виявлення несанкціонованого доступу або спотворення даних. Це особливо важливо для застосувань у військових, промислових та критично важливих інфраструктурах.

У динамічних середовищах Ad-Hoc мережі здатні підтримувати працездатність навіть за умов часткової деградації системи. Завдяки надлишковості маршрутів, можливості локального відновлення зв’язку та гнучкому розподілу ролей між вузлами забезпечується висока живучість мережі. Мобільні агенти додатково підсилюють цю властивість, компенсуючи втрату окремих каналів або вузлів шляхом альтернативних шляхів збору інформації [18].

Таким чином, архітектура та технологія Ad-Hoc у сенсорних мережах не лише забезпечують базову можливість обміну даними без фіксованої інфраструктури, але й створюють основу для впровадження адаптивних, інтелектуальних та енергоефективних методів збору й обробки інформації. Їх поєднання з мобільними агентами дозволяє суттєво розширити функціональні можливості безпроводових сенсорних мереж і забезпечити їх ефективне функціонування в умовах змінної топології та обмежених ресурсів [17].

1.4 Особливості маршрутизації та енергозбереження в динамічних мережах

Динамічні сенсорні мережі характеризуються постійними змінами топології, що зумовлено переміщенням вузлів, варіаціями енергетичних ресурсів, завадами у радіоканалі та можливими відмовами обладнання. У таких умовах ключовим завданням є забезпечення ефективної маршрутизації даних при мінімальному енергоспоживанні. Саме тому сучасні протоколи маршрутизації орієнтовані на адаптивність, локальність прийняття рішень і здатність швидко перебудовувати маршрути.

У динамічних мережах активно використовуються як реактивні, так і гібридні алгоритми маршрутизації, що дозволяють зменшити службовий трафік і уникнути перевантажень. На відміну від статичних систем, де маршрути залишаються сталими тривалий час, у БСМ маршрути мають властивість часто змінюватися, що ускладнює процес доставки пакетів і підвищує вимоги до енергоефективності. Загальні принципи маршрутизації в таких системах подано на схемі (Рис. 1.5) [19].

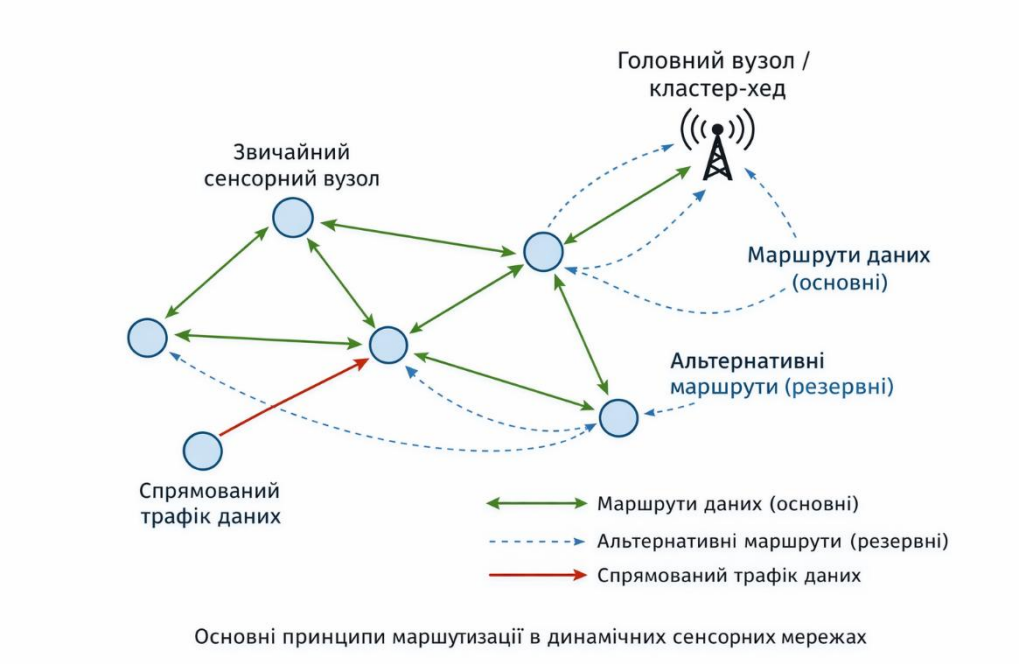


Рис. 1.5 – Основні принципи маршрутизації в динамічних сенсорних мережах [19]

Оскільки більша частина енергії сенсорного вузла витрачається саме на передавання даних, важливу роль відіграють методи енергозбереження. Найпоширенішими підходами є:

- мінімізація кількості ретрансляцій;
- використання коротких або енергетично оптимальних маршрутів;
- динамічне регулювання потужності передавання;
- введення сплячих режимів роботи вузлів;
- переміщення мобільних агентів для локальної обробки даних замість передавання великих потоків інформації.

Завдяки цьому знижується навантаження на мережу, подовжується термін служби батарей вузлів та підвищується загальна ефективність мережі. На Рис. 1.6 представлено типову модель енергоспоживання сенсорного вузла, яка застосовується для аналізу ефективності різних схем маршрутизації [20].

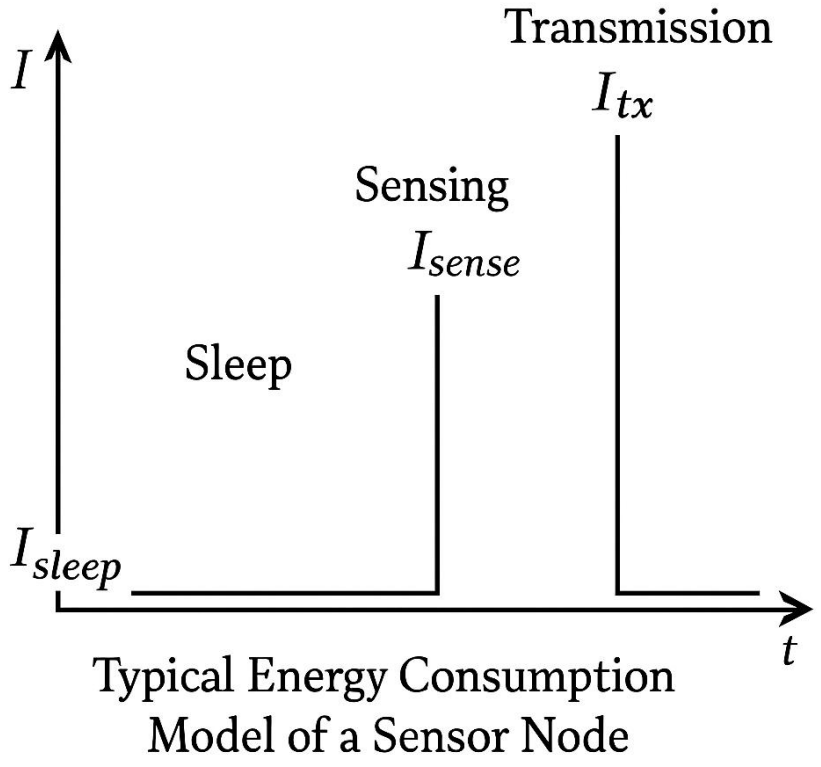


Рис. 1.6 - Модель енергоспоживання сенсорного вузла [20]

Порівняння різних підходів свідчить, що найкращі результати досягаються при поєднанні адаптивної маршрутизації з енергетичними політиками, які враховують залишковий заряд вузлів, завантаження каналу та відстань до цільового вузла. Додатково впровадження мобільних агентів дозволяє суттєво зменшити кількість переданих пакетів, що позитивно впливає на енергозбереження в умовах постійної зміни структури мережі.

Додатковим викликом у динамічних сенсорних мережах є забезпечення стабільності маршрутів за умов постійної зміни топології. Мобільність вузлів та варіації радіоканалу спричиняють руйнування маршрутів і потребують швидкого механізму їх відновлення. Для цього використовуються адаптивні підходи до маршрутизації, здатні відстежувати сусідів у реальному часі та мінімізувати надлишковий службовий трафік. Не менш важливим є питання енергоефективності: у мережах застосовуються алгоритми агрегації даних, керування режимами сну, вибору маршрутів з урахуванням енергетичного ресурсу та адаптивного регулювання потужності передавання. Крім того, для запобігання надмірному навантаженню на окремі вузли використовуються методи балансування трафіку та ротації кластер-хедів, що дозволяє суттєво збільшити життєвий цикл мережі.

У динамічних сенсорних мережах значний вплив на якість маршрутизації має стан радіоканалу, який змінюється під впливом перешкод, рельєфу місцевості, погодних умов або рухомих об’єктів. Ці чинники спричиняють коливання рівня сигналу та зміну доступності сусідніх вузлів, що ускладнює побудову надійних маршрутів. Тому сучасні протоколи маршрутизації застосовують механізми періодичної переоцінки якості каналу, адаптивного вибору швидкості передачі та динамічного перемикання між кількома шляхами. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність передачі даних і мінімізувати втрати пакетів навіть за умов високої нестабільності мережного середовища [22].

Використання мобільних агентів у процесі маршрутизації дозволяє суттєво зменшити кількість міжвузлових передач, які є найбільш енерговитратними. На

відміну від традиційної моделі, де кожен вузол надсилає вимірювання до центра, мобільний агент самостійно обходить вузли, виконує локальну обробку даних та передає лише агреговану інформацію. Це значно скорочує службовий трафік, зменшує рівень колізій у мережі та подовжує час роботи вузлів від автономного джерела живлення. Завдяки цьому мобільні агенти є ефективним інструментом оптимізації енергоспоживання в архітектурах з динамічною топологією [23].

Важливим аспектом енергозбереження у динамічних сенсорних мережах є взаємозв’язок між стратегіями маршрутизації та режимами роботи вузлів. Неефективний вибір маршрутів може призводити до швидкого виснаження енергетичних ресурсів окремих вузлів, що, у свою чергу, спричиняє фрагментацію мережі та втрату зв’язності. Тому сучасні підходи орієнтовані на рівномірний розподіл навантаження між вузлами, запобігання перевантаженню критичних ділянок мережі та підтримку її працездатності протягом максимально можливого часу.

Крім того, у динамічних умовах доцільним є використання комбінованих стратегій, які поєднують класичні протоколи маршрутизації з інтелектуальними механізмами прийняття рішень. Такі механізми можуть враховувати історію передач, прогноз змін топології та поточний стан енергоресурсів. Мобільні агенти в цьому випадку виконують роль адаптивного елементу, який здатний змінювати маршрут збору даних залежно від ситуації в мережі та пріоритетності інформації.

Таким чином, ефективна маршрутизація та енергозбереження в динамічних сенсорних мережах є взаємопов’язаними задачами, вирішення яких потребує комплексного підходу. Поєднання адаптивних алгоритмів маршрутизації, енергоефективних режимів роботи вузлів та використання мобільних агентів дозволяє значно підвищити надійність, живучість і тривалість функціонування безпроводових сенсорних мереж у складних та змінних умовах експлуатації [26].

2 МОБІЛЬНІ АГЕНТИ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Поняття мобільного агента та принципи його функціонування

Мобільний агент (МА) — це автономна програмна сутність, здатна переміщуватися між вузлами сенсорної мережі та виконувати локальну обробку даних, мінімізуючи потребу в централізованих обчисленнях та частих радіопередачах. На відміну від традиційних підходів, де всі дані надсилаються до центрального пункту обробки, мобільний агент переносить алгоритм до місця виникнення даних. Це дозволяє зменшити обсяг переданого трафіку, подовжити час роботи мережі та підвищити її адаптивність у динамічних умовах.

Мобільні агенти функціонують за принципом «переміщення коду, а не даних». Вони містять набір інструкцій, необхідних для виконання обчислень на певному сенсорному вузлі: фільтрацію, агрегацію, оцінку параметрів, калібрування показників, виявлення аномалій. По завершенню роботи на одному вузлі агент переходить до наступного, несучи із собою результати попередньої обробки.

Основні функції мобільного агента у WSN:

- Збір локальних даних. Агент отримує сирі вимірювання від сенсорного вузла без необхідності їх негайного передавання на центральний сервер.
- Локальна обробка і фільтрація. Використання алгоритмів агрегації та попередньої обробки дозволяє зменшити обсяг переданої інформації.
- Адаптація до змін топології. У динамічних середовищах агент здатний вибирати альтернативні маршрути або змінювати порядок обходу вузлів.
- Оптимізація енергоспоживання. Значне скорочення кількості радіопередач зменшує витрати енергії на кожному вузлі.
- Виявлення та корекція похибок. Мобільний агент може виконувати порівняльний аналіз сусідніх вимірювань і усувати дрейф параметрів [25].

Принцип функціонування мобільного агента (Рис. 2.1):

- Міграція між вузлами. Агент переміщується мережею по заздалегідь визначеному або адаптивному маршруту, отримуючи доступ до локальних ресурсів кожного сенсора.
- Автономність виконання. Після запуску МА здатний працювати без постійного підключення до центрального вузла.
- Збереження стану. Під час міграції агент переносить свій внутрішній стан, що дозволяє накопичувати оброблені дані.
- Відмовостійкість. У разі недоступності вузла агент знаходить альтернативний маршрут або коригує траєкторію руху.
- Легка інтеграція алгоритмів. У мобільних агентів можна змінювати набір функцій, що дає змогу швидко адаптувати поведінку системи до нових задач [24].

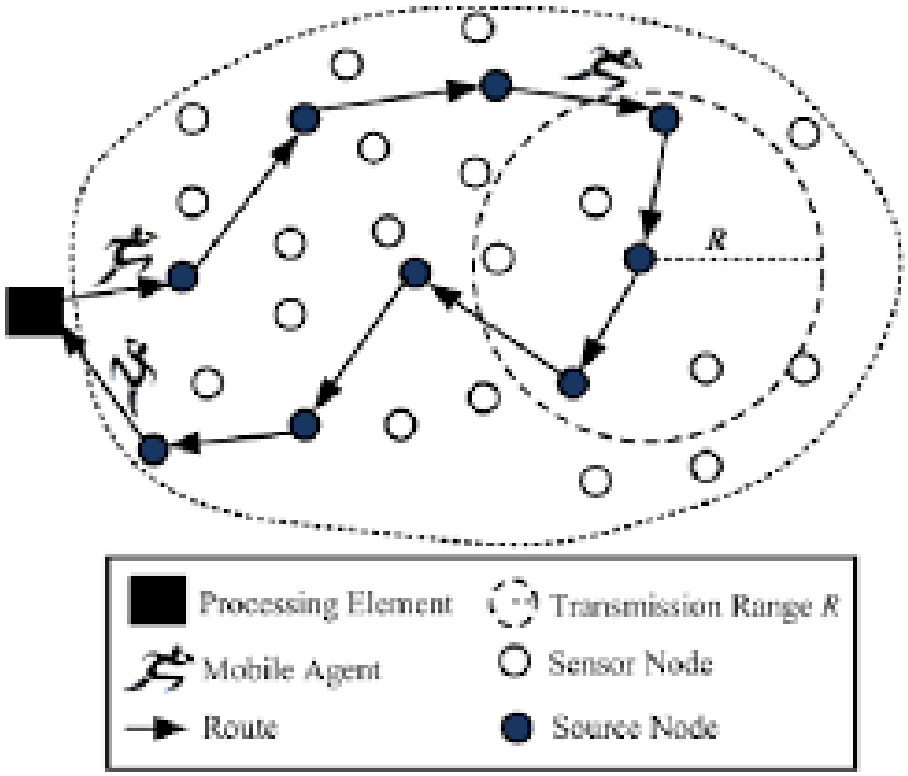


Рис. 2.1 – Принцип роботи мобільного агента у сенсорній мережі [24]

Додатковою перевагою мобільних агентів є їх здатність забезпечувати розподілене прийняття рішень у сенсорній мережі. Замість того щоб надсилати великі масиви даних на центральний сервер, де виконується аналіз, мобільні агенти виконують оцінювання ситуації безпосередньо на місці збору інформації. Це дозволяє швидко реагувати на локальні події, наприклад, перевищення порогів температури, появу небезпечних концентрацій газів або зміну траєкторії руху об’єкта. У результаті система в цілому стає менш залежною від центральних компонентів, що підвищує її надійність за умов обмеженої пропускної здатності каналу чи часткових відмов вузлів.

Ще одним важливим аспектом є адаптивність і навчальна здатність мобільних агентів. Сучасні підходи передбачають використання алгоритмів машинного навчання або евристичних стратегій оптимізації, які дають можливість агентам удосконалювати свою поведінку під час роботи в мережі. Наприклад, агент може поступово оптимізувати порядок обходу вузлів, зменшувати затримку збору даних або визначати найбільш енергетично вигідні маршрути. Така гнучкість робить мобільних агентів ефективним інструментом для роботи в середовищах зі швидкозмінною топологією, де статичні методи маршрутизації не забезпечують достатнього рівня адаптації [28].

Попри значні переваги, застосування мобільних агентів у сенсорних мережах має і низку обмежень, які необхідно враховувати під час проектування системи. Одним із ключових викликів є обмежені ресурси сенсорних вузлів — енергія, пам’ять та обчислювальна потужність. Переміщення агента, виконання локальних операцій і збереження проміжних станів можуть створювати додаткове навантаження на вузол, що потребує ретельного балансування між обсягом обчислень і витратами енергії. Також важливим аспектом є безпека: мобільні агенти повинні працювати у відкритому та потенційно недовіреному середовищі, де існує ризик підробки, перехоплення або модифікації їхнього коду. Забезпечення цілісності, автентичності та захисту маршруту агента є критичними умовами для практичного використання технології в реальних інфраструктурах.

Важливою особливістю мобільних агентів є їх тісна інтеграція з архітектурою безпроводової сенсорної мережі. На відміну від класичних клієнт–серверних моделей, де сенсорні вузли виступають лише джерелами даних, у мультиагентних системах вузли стають активними учасниками обчислювального процесу. Це дозволяє розподіляти обчислювальні навантаження між вузлами, зменшувати залежність від центрального пункту обробки та підвищувати масштабованість системи в цілому.

У контексті динамічних сенсорних мереж мобільні агенти виконують роль інтелектуального прошарку між фізичним рівнем збору даних і рівнем прийняття рішень. Вони здатні аналізувати поточний стан мережі, враховувати щільність розміщення вузлів, рівень завад у радіоканалі та залишковий енергетичний ресурс. На основі цієї інформації агент може змінювати стратегію своєї поведінки, наприклад, скорочувати маршрут обходу, пропускати вузли з критично низьким зарядом або змінювати алгоритми обробки даних [27].

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють координації декількох мобільних агентів, що одночасно функціонують у межах однієї сенсорної мережі. У такому випадку формується багатоагентна система, у якій агенти можуть обмінюватися результатами обробки, узгоджувати маршрути міграції та уникати дублювання функцій. Це дозволяє зменшити загальний час збору даних, підвищити ефективність використання ресурсів і забезпечити кращу відмовостійкість у разі втрати окремих агентів.

Ще одним важливим принципом функціонування мобільних агентів є контекстна обробка даних. Агент не лише збирає числові значення вимірювань, а й враховує контекст їх отримання: часові мітки, просторове розташування вузла, історію попередніх вимірювань та результати аналізу сусідніх сенсорів. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність інформації, зменшити вплив шумів і забезпечити більш точне виявлення подій, що мають критичне значення для системи моніторингу.

З практичної точки зору мобільні агенти є особливо ефективними у сценаріях, де сенсорна мережа функціонує в умовах обмеженої пропускної здатності або

нестабільного зв’язку. Наприклад, у зонах надзвичайних ситуацій, віддалених промислових об’єктах або природних середовищах із складним рельєфом мобільні агенти дозволяють забезпечити збір і аналіз даних навіть за тривалої відсутності зв’язку з центральним сервером. Після відновлення з’єднання агент передає агреговану та узагальнену інформацію, що значно зменшує навантаження на канал зв’язку.

Таким чином, мобільний агент у сенсорній мережі є не просто засобом оптимізації передачі даних, а повноцінним інтелектуальним елементом системи. Його здатність до автономної міграції, локальної обробки інформації, адаптації до змін середовища та взаємодії з іншими агентами робить цю технологію одним із найбільш перспективних напрямів розвитку безпроводових сенсорних мереж, особливо для застосувань у динамічних і ресурсно обмежених умовах [30].

Важливою характеристикою мобільних агентів є можливість гнучкого налаштування їх життєвого циклу. Залежно від поставленої задачі агент може бути одноразовим, виконуючи обхід мережі лише один раз, або довготривалим, періодично активуючись для збору та оновлення даних. Такий підхід дозволяє оптимально поєднувати оперативність отримання інформації з обмеженнями на енергоспоживання сенсорних вузлів, що є критичним фактором у безпроводових сенсорних мережах.

Крім того, мобільні агенти можуть бути класифіковані за рівнем складності виконуваних функцій. Найпростіші агенти виконують лише збір та пересилання агрегованих даних, тоді як більш складні реалізують алгоритми аналізу, прогнозування та прийняття рішень. У сучасних сенсорних мережах зростає інтерес до інтелектуальних агентів, які здатні самостійно змінювати стратегію роботи залежно від поточного стану мережі, пріоритетності завдань та характеристик контрольованого середовища.

З точки зору програмної реалізації мобільні агенти потребують спеціального середовища виконання на сенсорних вузлах. Таке середовище забезпечує безпечний запуск коду агента, контроль доступу до ресурсів вузла, збереження стану агента під

час міграції та відновлення виконання після переходу. Обмежені апаратні ресурси сенсорних вузлів висувають підвищені вимоги до компактності коду агентів і ефективності використовуваних алгоритмів, що впливає на вибір мов програмування та моделей виконання.

Ще одним аспектом функціонування мобільних агентів є питання синхронізації та узгодженості даних. У динамічних сенсорних мережах вимірювання можуть виконуватися асинхронно, а стан вузлів змінюватися з часом. Мобільні агенти, завдяки послідовному обходу вузлів та накопиченню контекстної інформації, дозволяють зменшити вплив асинхронності та підвищити узгодженість зібраних даних. Це особливо важливо для систем, де результати вимірювань використовуються для прийняття оперативних рішень.

Таким чином, мобільні агенти поєднують у собі властивості автономності, інтелектуальності та адаптивності, що робить їх ефективним інструментом для побудови сучасних безпроводових сенсорних мереж. Їх використання створює передумови для переходу від традиційних моделей централізованого збору даних до розподілених інтелектуальних систем, здатних ефективно функціонувати у складних і змінних умовах експлуатації.

Окремої уваги заслуговує питання взаємодії мобільних агентів між собою та з елементами сенсорної мережі. У складних системах може одночасно функціонувати декілька агентів, кожен з яких виконує окрему задачу — наприклад, збір даних з різних зон, контроль стану вузлів або аналіз аномальних подій. Для запобігання конфліктам і перевантаженню мережі застосовуються механізми координації агентів, які дозволяють розподіляти зони відповідальності, узгоджувати маршрути міграції та уникати дублювання обчислень. Така кооперативна взаємодія підвищує загальну ефективність системи та забезпечує масштабованість рішення [31].

2.2 Ролі мобільних агентів у зборі та передачі даних

Мобільні агенти (МА) є ключовим інструментом підвищення ефективності сенсорних мереж у динамічних умовах. Їхнє використання дозволяє реалізувати розподілену модель збору та аналізу інформації, зменшуючи залежність від центральних серверів і традиційних маршрутизаторів. Завдяки здатності переміщуватися між вузлами та виконувати локальну обробку, мобільні агенти значно зменшують обсяг трафіку, підвищують швидкість реакції системи та оптимізують витрати енергії.

Однією з основних ролей мобільних агентів є адаптивний збір даних. Агент відвідує сенсорні вузли згідно з визначеним або динамічно скоригованим маршрутом, виконує локальний аналіз і передає лише агреговані або стислий набір даних. Це мінімізує кількість радіопередач і підвищує загальну енергоефективність мережі. Візуалізацію ключових ролей мобільного агента подано на рисунку (Рис. 2.2) [15].

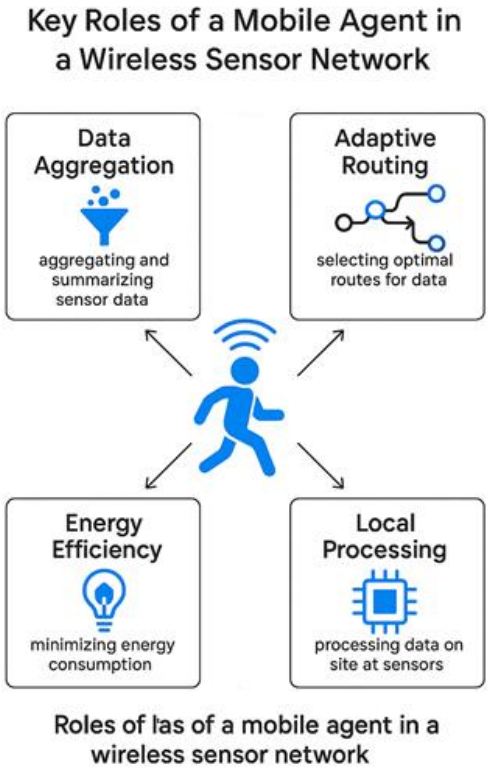


Рис. 2.2 – Ключові ролі мобільного агента [15]

Також мобільні агенти виконують функції динамічної маршрутизації даних. У середовищах зі змінною топологією вони здатні знаходити доступні шляхи в обхід ушкоджених або перевантажених ділянок мережі. Це робить систему стійкішою до відмов і дозволяє зберігати працездатність навіть за умов часткової деградації сенсорної інфраструктури.

Крім того, мобільні агенти забезпечують динамічну маршрутизацію, що особливо важливо в мережах зі змінною топологією. Вони здатні обходити пошкоджені або перевантажені ділянки, вибираючи оптимальні шляхи для переміщення та передачі результатів обробки. Це робить мережу стійкішою до відмов окремих вузлів і підвищує загальну надійність.

Ще однією важливою роллю МА є локальна обробка та діагностика стану сенсорів. Агент може виконувати калібрування, виявляти аномальні показники або визначати дрейф сенсорних параметрів. Завдяки цьому система здатна підтримувати високу якість вимірювань навіть протягом тривалих періодів експлуатації.

Не менш важливою є функція оптимізації енергоспоживання, адже більшість сенсорних вузлів працюють автономно. Перенесення обчислень до вузла замість передачі сирих даних дозволяє значно зменшити витрати енергії на радіомодуль, що традиційно є найенерговитратнішим компонентом.

Для узагальнення ролей мобільних агентів у сенсорних мережах наведено табл. 2.1, яка демонструє їх ключові функції та переваги в умовах динамічної роботи системи [16].

Таблиця 2.1 Основні ролі мобільних агентів у сенсорних мережах [16]

Роль мобільного агента	Опис	Переваги у динамічних WSN
Збір локальних даних	Отримання показників безпосередньо з вузлів	Зменшення радіопередач і трафіку
Агрегація та фільтрація	Локальна обробка, видалення шумів, усереднення	Підвищення точності та зменшення навантаження
Адаптивна маршрутизація	Вибір оптимального шляху залежно від стану мережі	Стійкість до відмов, гнучкість маршруту
Калібрування та діагностика	Виявлення похибок, відхилень та дрейфу сенсорів	Покращення достовірності вимірювань
Енергетична оптимізація	Заміна передачі сирих даних локальною обробкою	Подовження часу автономної роботи вузлів
Прийняття рішень у реальному часі	Локальна реакція на події та їх оцінка	Скорочення часу реагування системи

У складніших системах мобільні агенти також взаємодіють між собою, формуючи мультиагентне середовище, де кожен агент може мати власні цілі та сценарії поведінки. Такий підхід дозволяє масштабувати обробку даних, уникати перевантажень та розподіляти завдання між різними частинами мережі. У результаті сенсорна мережа отримує властивості самоорганізації та самовідновлення, що значно підвищує її придатність до використання у критичних і динамічних сценаріях.

Узагальнюючи викладене, мобільні агенти відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності та адаптивності сенсорних мереж, особливо в умовах динамічних змін топології та обмежених енергетичних ресурсів. Завдяки здатності переміщуватися між вузлами, виконувати локальну обробку, оптимізувати маршрути передачі та зменшувати обсяг трафіку, вони істотно підвищують продуктивність і живучість системи. Поєднання агентного підходу з сучасними методами оптимізації робить мобільні агенти перспективним інструментом для побудови масштабованих, надійних та енергоефективних безпроводових сенсорних мереж нового покоління.

Окрему роль мобільні агенти відіграють у підтриманні узгодженості та цілісності даних у сенсорній мережі. В умовах динамічного середовища вимірювання можуть виконуватися асинхронно, з різною частотою та за різних умов функціонування вузлів. Це ускладнює подальший аналіз інформації та може призводити до появи суперечливих або некоректних результатів. Мобільний агент, послідовно відвідуючи вузли, має змогу враховувати часовий контекст вимірювань, виконувати нормалізацію даних та формувати узгоджені набори інформації для подальшої обробки [21].

Важливою перевагою мобільних агентів є можливість реалізації подієво-орієнтованого збору даних. У традиційних сенсорних мережах вимірювання часто передаються з фіксованою періодичністю незалежно від їх значущості. Агентний підхід дозволяє змінювати поведінку системи залежно від характеру подій: у разі виявлення критичних відхилень агент може збільшити частоту опитування вузлів, розширити зону обходу або ініціювати додаткові обчислення. Це підвищує оперативність реагування та ефективність використання ресурсів мережі.

Мобільні агенти також можуть виконувати функції контролю стану мережі. Під час міграції агент збирає інформацію про рівень заряду батарей, якість радіоканалу, завантаження вузлів та наявність збоїв у роботі обладнання. На основі цих даних формується уявлення про поточний стан мережі, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми та приймати рішення щодо переналаштування маршрутизації або зміни ролей вузлів. Такий підхід підвищує живучість сенсорної мережі та зменшує ймовірність її деградації.

У контексті великих сенсорних мереж особливого значення набуває роль мобільних агентів у масштабуванні системи. Зі збільшенням кількості вузлів традиційні методи централізованого збору даних призводять до різкого зростання трафіку та затримок. Агентна модель дозволяє розподілити обробку даних між різними ділянками мережі, зменшуючи навантаження на центральні компоненти.

Кожен агент може обслуговувати окремий кластер або зону відповідальності, що забезпечує лінійне масштабування системи без суттєвого погіршення її характеристик.

Ще одним важливим аспектом є роль мобільних агентів у забезпеченні інформаційної безпеки. Агенти можуть виконувати первинну перевірку достовірності даних, виявляти підозрілі показники або аномальні патерни поведінки вузлів, що можуть свідчити про збої або несанкціоноване втручання. Локальна обробка даних зменшує ризик перехоплення інформації під час передачі та дозволяє реалізувати додаткові механізми захисту без значного збільшення мережевого навантаження.

У мультиагентних системах мобільні агенти можуть обмінюватися інформацією між собою, координуючи свої дії та оптимізуючи загальну стратегію збору даних. Наприклад, агенти можуть узгоджувати маршрути обходу, щоб уникати дублювання роботи, або передавати результати аналізу для формування глобальної картини стану середовища. Така взаємодія сприяє підвищенню ефективності всієї системи та дозволяє реалізувати колективні механізми прийняття рішень [19].

З практичної точки зору, застосування мобільних агентів є особливо доцільним у системах моніторингу великої протяжності або складної структури, таких як екологічні мережі спостереження, промислові об’єкти, транспортні системи та об’єкти критичної інфраструктури. У таких сценаріях агентний підхід дозволяє зменшити залежність від стабільного каналу зв’язку та забезпечити збір даних навіть за умов часткової втрати мережної зв’язності.

Таким чином, ролі мобільних агентів у зборі та передачі даних не обмежуються лише функціями збору та маршрутизації. Вони охоплюють локальну обробку, діагностику, адаптацію, координацію та підтримку прийняття рішень у сенсорній мережі. Саме завдяки такій багатофункціональності мобільні агенти стають ключовим елементом сучасних безпроводових сенсорних мереж, здатних ефективно працювати у динамічних, енергетично обмежених та критичних умовах експлуатації [13].

2.3 Алгоритми міграції та маршрутизації мобільних агентів

Однією з ключових характеристик мобільних агентів у сенсорних мережах є їхня здатність переміщуватися між вузлами, виконуючи збір даних, локальну обробку та оптимізацію потоків інформації. Для забезпечення ефективності такого переміщення використовуються спеціальні алгоритми міграції, які визначають маршрут, порядок відвідування вузлів та спосіб взаємодії з мережею. Вибір алгоритму безпосередньо впливає на енергоспоживання, затримки передачі, точність вимірювань та надійність усієї системи.

У динамічних сенсорних мережах міграція мобільних агентів повинна враховувати зміни топології, можливі відмови вузлів та нестабільність каналів зв’язку. Тому класичні статичні маршрути є малоефективними. Натомість використовуються адаптивні алгоритми, які дозволяють агентам коригувати маршрут у реальному часі. До таких підходів належать алгоритми на основі локальної інформованості, стохастичні методи, евристичні моделі та маршрутизація, що керується подіями [23].

Одним із найпоширеніших підходів є маршрутизація за принципом мінімального енергоспоживання, коли агент обирає шлях, який мінімізує сумарну енерговитрату вузлів. Інший підхід — маршрутизація за пріоритетом даних, коли маршрут визначається на основі важливості інформації або рівня змін у середовищі. У мережах з високою мобільністю застосовуються прогностичні алгоритми, що враховують історію змін топології та передбачають можливі маршрути зв’язку.

Алгоритми міграції мобільних агентів умовно можна поділити на чотири групи:

1. Детерміновані маршрути (Deterministic Path Planning). Агент заздалегідь отримує список вузлів, які має відвідати, і рухається фіксованим маршрутом. Підходить для стабільних мереж, але мало ефективний у динамічних умовах.

2. Стохастичні маршрути (Random Walk, Biased Random Walk). Агент обирає наступний вузол випадково або з певною ймовірністю. Це зменшує потребу в маршрутизаторах, але може збільшити час обходу.
3. Алгоритми на основі оптимізації (Genetic Algorithms, Ant Colony Optimization). Такі підходи дають можливість будувати адаптивні маршрути, що мінімізують час обходу та споживання енергії. Особливо ефективні при великій кількості вузлів.
4. Алгоритми з багатьма агентами (Multi-Agent Routing). Кілька агентів працюють паралельно, координуючи маршрути, щоб мінімізувати дублювання та прискорити збір даних. Підхід підвищує масштабованість системи.

   На рисунку наведено узагальнену схему міграції мобільного агента між сенсорними вузлами залежно від типу маршрутизації (Рис. 2.3) [1].

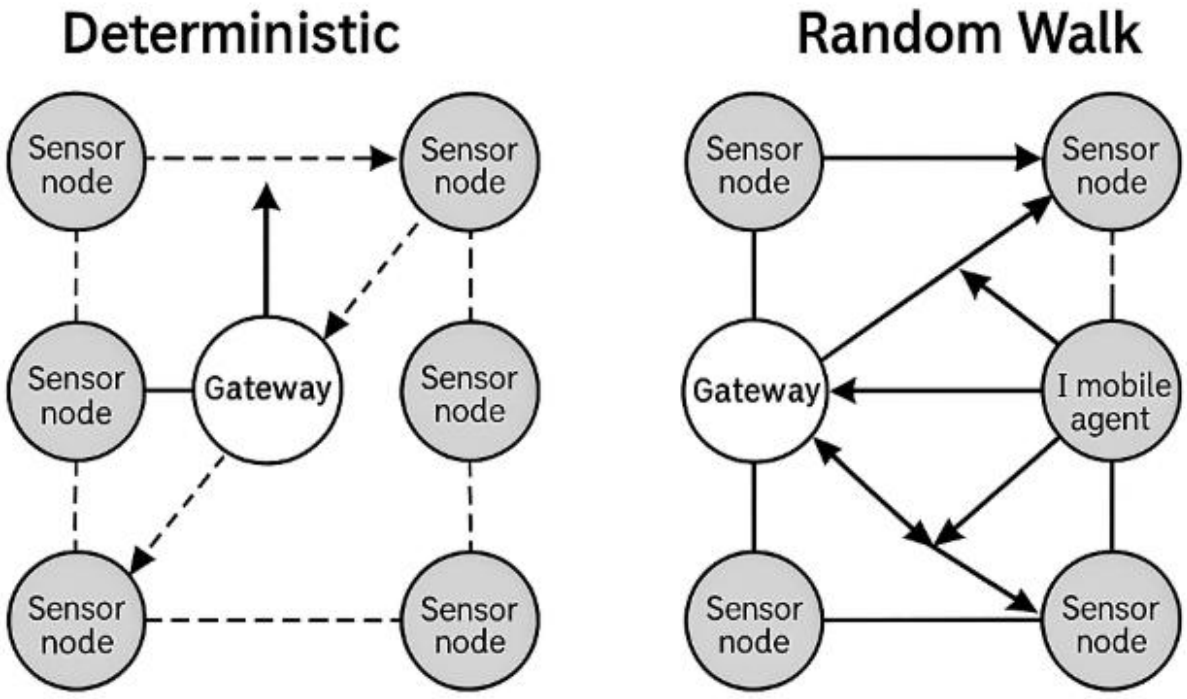


Рис. 2.3 – Міграція мобільного агента [1]

Ефективність алгоритмів міграції також визначається тим, як мобільний агент обробляє зібрані дані. У деяких моделях агент виконує агрегацію та фільтрацію

безпосередньо на вузлі, уникаючи передачі надлишкової інформації мережею. Це значно зменшує обсяг трафіку та подовжує тривалість роботи сенсорних вузлів.

Крім того, важливо враховувати затримку доставки інформації. У застосуваннях, де потрібні дані в реальному часі, використовуються алгоритми з обмеженням максимальної довжини маршруту або алгоритми з пріоритетом критичних подій. У мережах моніторингу з низькою критичністю перевага надається алгоритмам енергоощадного обходу.

Таким чином, ефективна маршрутизація мобільних агентів є ключовою умовою стабільної та довговічної роботи сенсорної мережі. Вибір алгоритму має ґрунтуватися на характеристиках мережі, рівні динамічності середовища, енергетичних можливостях вузлів та вимогах до точності й швидкості збирання даних.

Важливим аспектом алгоритмів міграції мобільних агентів є їх здатність працювати в умовах часткової або повної втрати зв’язку з центральним вузлом керування. У таких ситуаціях агент повинен приймати рішення автономно, спираючись лише на локальну інформацію про стан мережі та попередній досвід міграції. Це вимагає використання механізмів локальної оцінки доступності вузлів, залишкового енергетичного ресурсу та якості радіоканалу. Автономність агентів підвищує стійкість сенсорної мережі до збоїв і дозволяє зберігати працездатність системи навіть за несприятливих умов функціонування [21].

Ще одним важливим чинником є масштабованість алгоритмів міграції. Зі збільшенням кількості сенсорних вузлів зростає складність побудови оптимальних маршрутів, що може призводити до перевантаження окремих ділянок мережі або збільшення затримок збору даних. Тому сучасні підходи орієнтовані на розподілені та ієрархічні алгоритми, які дозволяють локалізувати прийняття рішень і обмежувати область впливу мобільного агента. Це забезпечує стабільну роботу мережі при її розширенні та дозволяє ефективно застосовувати агентні технології у великих динамічних сенсорних системах.

Важливим напрямом розвитку алгоритмів міграції мобільних агентів є використання контекстної інформації про середовище. Агент може враховувати не лише стан мережі, але й характеристики контрольованого об’єкта або процесу, що спостерігається. Наприклад, у разі виявлення різкої зміни параметрів середовища агент може змінити маршрут обходу, приділяючи більше уваги вузлам у критичній зоні. Такий контекстно-орієнтований підхід дозволяє підвищити інформативність зібраних даних без істотного збільшення енергетичних витрат.

Окрему увагу приділяють алгоритмам міграції, що враховують обмеження часу виконання. У реальних системах моніторингу часто встановлюються часові обмеження на доставку даних, особливо у випадках аварійних або небезпечних подій. У таких умовах мобільні агенти використовують маршрути з мінімальною затримкою або застосовують механізми часткового повернення результатів, коли критично важлива інформація передається негайно, а менш значущі дані обробляються пізніше. Це дозволяє поєднати вимоги реального часу з обмеженими ресурсами сенсорної мережі [13].

Ще одним перспективним підходом є поєднання алгоритмів міграції мобільних агентів з методами навчання. Агент може накопичувати статистику успішних і неефективних маршрутів, оцінювати енергетичні витрати та затримки, а з часом удосконалювати свою стратегію переміщення. Такі самонавчальні алгоритми дозволяють адаптувати поведінку агентів до конкретних умов експлуатації мережі та зменшити потребу в ручному налаштуванні параметрів маршрутизації.

Загалом, алгоритми міграції та маршрутизації мобільних агентів є одним із ключових елементів ефективної роботи сенсорних мереж у динамічних середовищах. Їх правильний вибір і налаштування дозволяють досягти компромісу між точністю даних, швидкістю збору, енергоефективністю та стійкістю системи. Подальший розвиток цих алгоритмів пов’язаний із впровадженням інтелектуальних методів адаптації та тісною інтеграцією агентного підходу з сучасними технологіями аналізу даних [28].

2.4 Переваги використання мобільних агентів у динамічних мережах

Використання мобільних агентів у безпроводових сенсорних мережах забезпечує низку суттєвих переваг порівняно з традиційними підходами до збору та передачі даних. Особливо відчутними ці переваги є у динамічних середовищах, де топологія мережі часто змінюється, а ресурси сенсорних вузлів є обмеженими. Завдяки автономності та здатності до міграції мобільні агенти дозволяють реалізувати більш гнучку та адаптивну модель функціонування мережі.

Однією з ключових переваг є зменшення обсягу мережевого трафіку. Мобільні агенти переносять обчислення безпосередньо до місця виникнення даних, виконуючи локальну обробку, фільтрацію та агрегацію вимірювань. Це дозволяє передавати лише узагальнену або найбільш важливу інформацію, що значно знижує навантаження на радіоканал і зменшує ймовірність колізій у мережі [30].

Ще однією важливою перевагою є підвищення енергоефективності сенсорних вузлів. Оскільки радіопередача є найбільш енерговитратною операцією, скорочення кількості переданих пакетів безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи мережі. Мобільні агенти дозволяють рівномірніше розподіляти навантаження між вузлами та уникати швидкого розрядження окремих елементів мережі.

У динамічних мережах особливого значення набуває адаптивність до змін топології. Мобільні агенти здатні оперативно змінювати маршрути міграції у разі відмови вузлів, появи перешкод або зміни умов зв’язку. Це забезпечує стійкість системи до збоїв і дозволяє зберігати працездатність мережі без необхідності централізованого переналаштування.

Важливою перевагою є також підвищення достовірності та якості даних. Завдяки можливості виконання локальної перевірки вимірювань, взаємного порівняння даних сусідніх вузлів та калібрування сенсорів, мобільні агенти сприяють зменшенню впливу похибок і дрейфу параметрів. Це є особливо актуальним для довготривалих систем моніторингу.

Крім того, мобільні агенти сприяють масштабованості сенсорних мереж. Зі збільшенням кількості вузлів агентний підхід дозволяє локалізувати процеси збору та обробки даних, не перевантажуючи центральні компоненти системи. Це робить можливим застосування сенсорних мереж великої розмірності у складних та змінних середовищах.

Таким чином, використання мобільних агентів у динамічних сенсорних мережах забезпечує комплексне підвищення ефективності, надійності та енергоощадності системи, що підтверджує доцільність їх застосування у сучасних та перспективних інформаційно-вимірювальних комплексах.

Переваги застосування мобільних агентів у динамічних сенсорних мережах наочно ілюструє порівняльна схема організації збору даних, де агент виконує локальну обробку інформації безпосередньо на вузлах мережі, зменшуючи кількість переданих повідомлень (Рис. 2.4) [11].

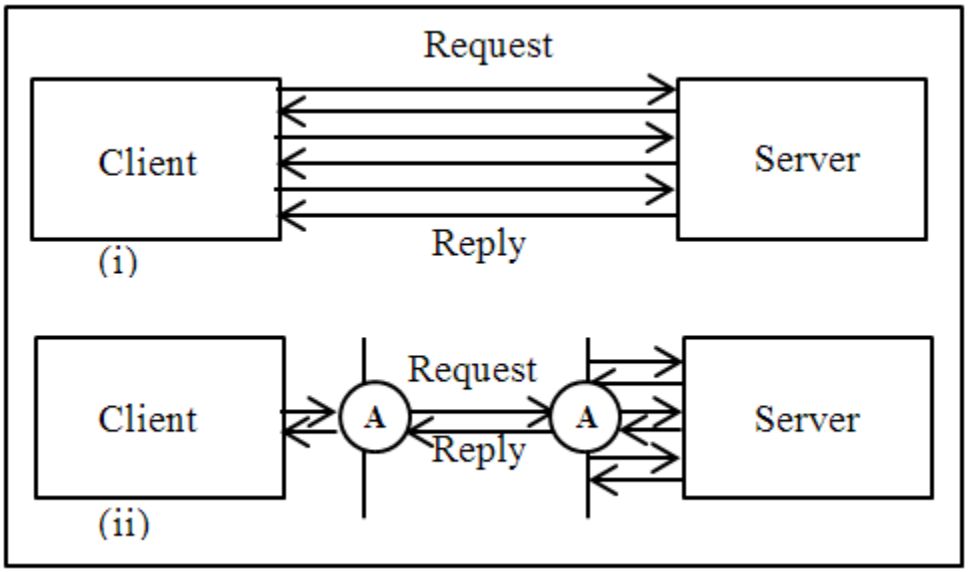


Рис. 2.4 – Застосування мобільного агента у сенсорних мережах [11]

Ще однією суттєвою перевагою використання мобільних агентів є зниження залежності сенсорної мережі від центрального вузла керування. У традиційних архітектурах відмова або перевантаження центрального пункту може призвести до втрати значної частини даних або повної зупинки системи. Агентний підхід дозволяє

перенести більшість функцій аналізу та прийняття рішень на локальний рівень, що підвищує живучість мережі та зменшує ризик критичних відмов [10].

Використання мобільних агентів також спрощує інтеграцію сенсорних мереж з іншими інформаційними системами та сервісами. Агент може виступати як інтерфейс між сенсорною мережею та зовнішніми обчислювальними платформами, виконуючи попередню обробку, форматування або відбір даних відповідно до вимог прикладного рівня. Це особливо важливо для систем «розумного міста», промислового моніторингу та Інтернету речей, де необхідна взаємодія великої кількості різнорідних компонентів.

Додатковою перевагою є підвищення гнучкості програмної архітектури сенсорної мережі. Функціональність мобільних агентів може змінюватися без фізичного втручання у роботу вузлів — достатньо оновити програмний код агента або сценарій його поведінки. Це дозволяє швидко адаптувати систему до нових задач моніторингу, змін умов експлуатації або появи нових типів сенсорів.

З точки зору інформаційної безпеки мобільні агенти також відкривають нові можливості. Вони можуть виконувати локальний аналіз аномальної активності, виявляти несанкціоновані втручання або порушення цілісності даних ще на рівні сенсорних вузлів. Такий підхід дозволяє зменшити час реагування на інциденти та обмежити поширення потенційно небезпечної інформації мережею.

Крім того, агентний підхід сприяє більш раціональному використанню ресурсів у мережах з обмеженою пропускною здатністю. У ситуаціях, коли канал зв’язку є нестабільним або перевантаженим, мобільний агент може тимчасово відкласти передачу даних, накопичити їх локально або виконати додаткову агрегацію. Це дозволяє підтримувати функціонування системи навіть за несприятливих умов зв’язку.

Отже, переваги використання мобільних агентів у динамічних сенсорних мережах проявляються на всіх рівнях системи — від окремого сенсорного вузла до загальної архітектури мережі [7].

3 МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗБОРУ ДАНИХ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

3.1 Постановка задачі збору даних у змінних умовах середовища

У сучасних безпроводових сенсорних мережах задача збору даних ускладнюється впливом змінних умов середовища, до яких належать мобільність сенсорних вузлів, нестабільність радіоканалу, наявність перешкод, обмеженість енергетичних ресурсів та можливі відмови окремих елементів мережі. За таких умов традиційні методи централізованого або статичного збору даних втрачають ефективність і не забезпечують необхідного рівня надійності та оперативності.

Постановка задачі збору даних у динамічному середовищі передбачає необхідність забезпечення своєчасного отримання достовірної інформації від множини сенсорних вузлів за мінімальних витрат енергоресурсу та мережевого трафіку. При цьому система повинна бути здатною адаптуватися до змін топології мережі, коливань якості зв’язку та неоднорідності навантаження між вузлами.

Нехай безпроводова сенсорна мережа складається з множини вузлів $N=\{n_1,n_2,\ldots,n_k\}$, кожен з яких здійснює вимірювання параметрів навколишнього середовища та має обмежений енергетичний ресурс. Дані, отримані вузлами, необхідно передати до пункту обробки або зібрати за допомогою мобільних агентів, які здійснюють міграцію мережею відповідно до обраної стратегії збору [9].

Основною метою задачі є визначення таких методів і алгоритмів збору даних, які дозволяють:

- мінімізувати кількість переданих повідомлень у мережі;
- знизити енергоспоживання сенсорних вузлів;
- забезпечити повноту та достовірність зібраних вимірювань;
- підвищити стійкість системи до змін умов функціонування.

У рамках цієї задачі особлива увага приділяється використанню мобільних агентів, які виконують локальну обробку даних безпосередньо на сенсорних вузлах. Такий підхід дозволяє переносити обчислювальні операції до джерел інформації, зменшуючи навантаження на радіоканал і забезпечуючи адаптивну поведінку системи у змінних умовах.

Таким чином, постановка задачі збору даних у динамічних середовищах зводиться до пошуку оптимального компромісу між точністю вимірювань, швидкістю збору інформації та енергоефективністю безпроводової сенсорної мережі.

Для формалізації задачі збору даних у змінних умовах середовища використовується узагальнена модель безпроводової сенсорної мережі, у якій сенсорні вузли здійснюють вимірювання параметрів, а мобільні агенти виконують збір, локальну обробку та доставку агрегованих даних до пункту обробки з урахуванням змін топології та стану мережі (Рис. 3.1) [2].

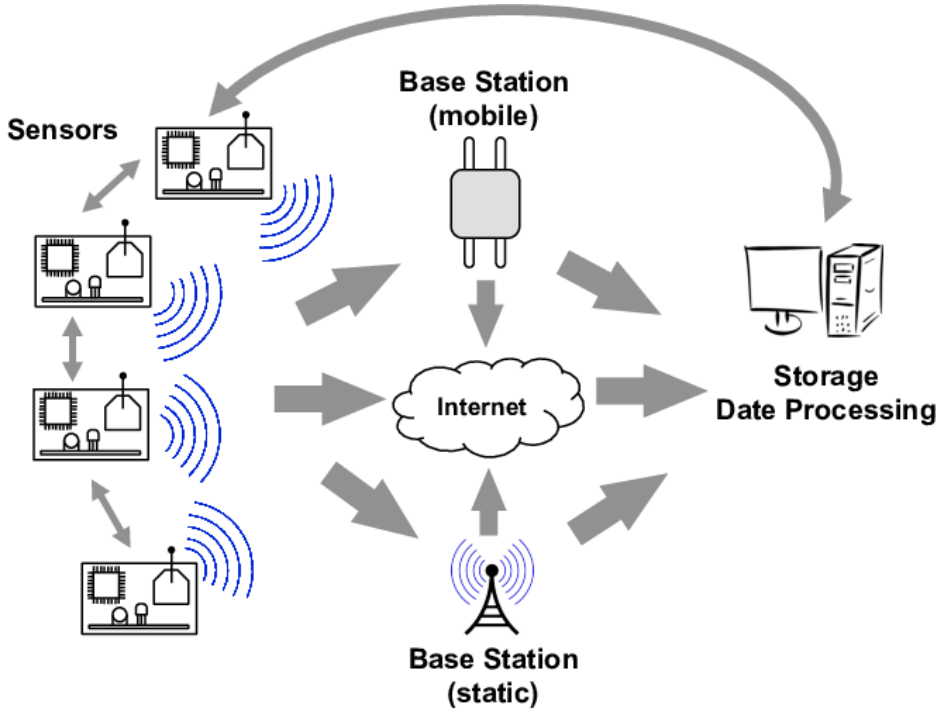


Рис. 3.1 – Модель збору даних у безпроводової сенсорної мережі [2]

Важливою складовою задачі збору даних у змінних умовах є врахування часових обмежень. У багатьох прикладних сценаріях, таких як моніторинг аварійних ситуацій, техногенних процесів або стану навколишнього середовища, дані мають цінність лише протягом обмеженого інтервалу часу. Тому система збору повинна забезпечувати мінімальні затримки доставки інформації та своєчасне реагування на критичні зміни контрольованих параметрів.

Окрім цього, змінність середовища призводить до неоднорідності якості вимірювань, що може бути спричинена впливом зовнішніх факторів, дрейфом параметрів сенсорів або завадами радіоканалу. У зв’язку з цим задача збору даних включає не лише передачу вимірювань, але й попередню оцінку їх достовірності, фільтрацію шумів та узгодження даних між сусідніми вузлами. Реалізація таких функцій безпосередньо на рівні сенсорної мережі дозволяє зменшити обсяг некоректної або надлишкової інформації.

Ще одним аспектом постановки задачі є обмеженість ресурсів сенсорних вузлів. Низька обчислювальна потужність, обмежений обсяг пам’яті та автономне живлення накладають суттєві вимоги на алгоритми збору даних. Вони повинні бути простими для реалізації, не потребувати значних обчислювальних витрат і забезпечувати рівномірний розподіл навантаження між вузлами мережі [1].

У цьому контексті застосування мобільних агентів дозволяє сформувати більш гнучку модель збору даних, у якій частина обчислювальних задач переноситься з центрального пункту обробки безпосередньо в мережу. Мобільні агенти можуть адаптувати свої маршрути, змінювати стратегії збору та обробки інформації залежно від поточного стану мережі, що є особливо важливим у динамічних умовах функціонування.

Таким чином, задача збору даних у змінних середовищах сенсорних мереж є багатокритеріальною і вимагає комплексного підходу, який поєднує енергоефективність, адаптивність, надійність та якість отриманої інформації.

Важливою особливістю задачі збору даних у змінних умовах середовища є необхідність урахування просторово-часових характеристик вимірювань. У безпроводових сенсорних мережах значення параметрів, що вимірюються, можуть суттєво відрізнятися залежно від місця розташування вузла та моменту часу. Це вимагає не лише збору окремих вимірювань, але й їх узгодження у просторі та часі для формування коректної картини стану контрольованого середовища. Мобільні агенти, переміщуючись між вузлами, мають змогу враховувати ці залежності та виконувати кореляційний аналіз даних безпосередньо в мережі.

Ще одним важливим аспектом є динаміка навантаження в сенсорній мережі. У різні моменти часу окремі вузли можуть генерувати значно більший обсяг даних, наприклад, у разі виникнення аномальних подій або різких змін параметрів середовища. За таких умов централізований збір даних може призвести до перевантаження окремих каналів зв’язку та збільшення затримок. Використання мобільних агентів дозволяє локалізувати процес обробки даних у зонах підвищеної активності та зменшити негативний вплив пікових навантажень на роботу всієї мережі [8].

Задача збору даних також ускладнюється необхідністю підтримки узгодженості інформації між вузлами. У динамічних середовищах можливі ситуації, коли різні сенсорні вузли фіксують суперечливі або несумісні значення параметрів через похибки вимірювань, затримки передачі або тимчасові збої. У таких випадках мобільні агенти можуть виконувати функції узгодження даних, порівнюючи вимірювання з декількох джерел, виявляючи відхилення та формуючи узагальнені оцінки параметрів.

Особливу увагу при постановці задачі збору даних слід приділяти питанням масштабованості системи. Зі збільшенням кількості сенсорних вузлів зростає складність організації ефективного збору інформації та керування мережею. Традиційні методи, орієнтовані на фіксовану інфраструктуру, погано масштабуються та потребують значних ресурсів для підтримки працездатності. Агентний підхід дозволяє розподілити

навантаження між різними ділянками мережі та забезпечити ефективний збір даних навіть у великих сенсорних системах.

Не менш важливим є питання надійності та відмовостійкості процесу збору даних. У реальних умовах експлуатації сенсорні вузли можуть виходити з ладу через розрядження батарей, механічні пошкодження або несприятливі умови навколишнього середовища. У таких ситуаціях система збору даних повинна автоматично адаптуватися до втрати окремих елементів і забезпечувати продовження роботи без суттєвого зниження якості інформації. Мобільні агенти, маючи можливість змінювати маршрути та стратегії збору, сприяють підвищенню живучості сенсорної мережі [16].

З точки зору оптимізації, задача збору даних у змінних умовах може розглядатися як задача багатокритеріальної оптимізації. Основними критеріями є мінімізація енергоспоживання, зменшення затримок передачі, максимізація повноти даних та підвищення достовірності вимірювань. Досягнення оптимального рішення потребує компромісу між цими показниками, що ускладнює розробку універсальних алгоритмів. Саме тому в сучасних підходах все частіше застосовуються адаптивні та евристичні методи, здатні підлаштовуватися під поточні умови функціонування мережі.

У задачі збору даних також важливу роль відіграє інформаційна взаємодія між мобільними агентами та сенсорними вузлами. Агент повинен мати доступ до локальних даних вузла, інформації про його енергетичний стан, якість зв’язку з сусідами та поточне навантаження. На основі цієї інформації агент може приймати рішення щодо доцільності відвідування вузла, обсягу обробки даних або зміни маршруту міграції. Такий підхід дозволяє реалізувати більш інтелектуальну та контекстно-залежну модель збору інформації.

Окремим аспектом постановки задачі є забезпечення безпеки процесу збору даних. У відкритих безпроводових середовищах існує ризик перехоплення, підміни або спотворення інформації. Мобільні агенти можуть бути використані для реалізації

механізмів локального контролю цілісності даних, автентифікації вузлів та виявлення підозрілої активності. Це підвищує загальний рівень захищеності системи збору даних і зменшує ймовірність поширення некоректної інформації [4].

Крім того, задача збору даних у змінних умовах повинна враховувати специфіку прикладної області. Вимоги до швидкості, точності та періодичності збору даних можуть суттєво відрізнятися залежно від того, чи йдеться про екологічний моніторинг, промислову діагностику, медичні системи або військові застосування. Агентний підхід дозволяє адаптувати стратегії збору даних під конкретні задачі без необхідності повної перебудови мережевої інфраструктури.

Таким чином, розширена постановка задачі збору даних у змінних умовах середовища охоплює широкий спектр факторів, пов’язаних із динамікою мережі, обмеженістю ресурсів, вимогами до якості інформації та надійності системи. Використання мобільних агентів створює передумови для реалізації гнучкої, адаптивної та енергоефективної моделі збору даних, яка здатна ефективно функціонувати у складних і непередбачуваних умовах. Це обґрунтовує доцільність подальшої розробки та дослідження алгоритмів агентного збору даних, що і є предметом наступних підрозділів роботи [5].

3.2 Моделі взаємодії вузлів та мобільних агентів

Ефективність збору та обробки даних у безпроводових сенсорних мережах значною мірою визначається моделлю взаємодії між сенсорними вузлами та мобільними агентами. У динамічних середовищах така взаємодія повинна забезпечувати адаптивність до змін топології, мінімізацію енергоспоживання та стійкість до відмов окремих елементів мережі.

Сенсорні вузли у взаємодії з мобільними агентами виконують роль джерел первинної інформації, забезпечуючи вимірювання параметрів навколишнього

середовища, збереження даних та їх передачу агентам. Мобільні агенти, у свою чергу, є автономними програмними компонентами, здатними мігрувати між вузлами, виконувати локальну обробку вимірювань та приймати рішення щодо подальшої маршрутизації або агрегації даних [10].

Однією з базових моделей є клієнт-агентна модель, у якій сенсорні вузли виступають пасивними постачальниками даних, а мобільні агенти ініціюють взаємодію, відвідуючи вузли відповідно до заданого або адаптивного маршруту. Такий підхід дозволяє зменшити кількість запитів у мережі та уникнути постійної передачі вимірювань у центральний пункт обробки.

Іншою поширеною моделлю є подієво-орієнтована взаємодія, за якої мобільний агент активується лише у разі виникнення певної події або перевищення контрольованих параметрів заданих порогів. У цьому випадку агент виконує локальний аналіз ситуації, збирає дані з групи суміжних вузлів та формує узагальнений звіт. Така модель є ефективною для систем моніторингу аварійних або критичних станів.

У складніших сценаріях застосовується кооперативна модель взаємодії, де декілька мобільних агентів одночасно функціонують у мережі та обмінюються між собою інформацією. Це дозволяє розподілити навантаження, скоротити час збору даних і підвищити масштабованість системи. Координація дій агентів може здійснюватися як централізовано, так і на основі локальних правил взаємодії.

Важливою особливістю моделей взаємодії є підтримка автономності мобільних агентів. У разі втрати зв’язку з координатором або центральним вузлом агент повинен мати змогу продовжувати виконання завдання, накопичувати результати та передавати їх після відновлення з’єднання. Це підвищує надійність системи та забезпечує її працездатність у змінних умовах [20].

Таким чином, вибір моделі взаємодії сенсорних вузлів і мобільних агентів визначається вимогами до енергоефективності, швидкодії, надійності та масштабованості сенсорної мережі. У динамічних середовищах найбільш доцільними є адаптивні та кооперативні моделі, що поєднують локальну обробку даних із гнучким управлінням процесом збору інформації.

Взаємодія сенсорних вузлів і мобільних агентів може бути подана у вигляді узагальненої структурної моделі, де агент здійснює міграцію між вузлами, виконує локальну обробку даних і приймає рішення щодо подальших дій на основі поточного стану мережі (Рис. 3.2). Такий підхід дозволяє мінімізувати обсяг передаваних повідомлень і забезпечити адаптивну поведінку системи в умовах змінної топології [19].

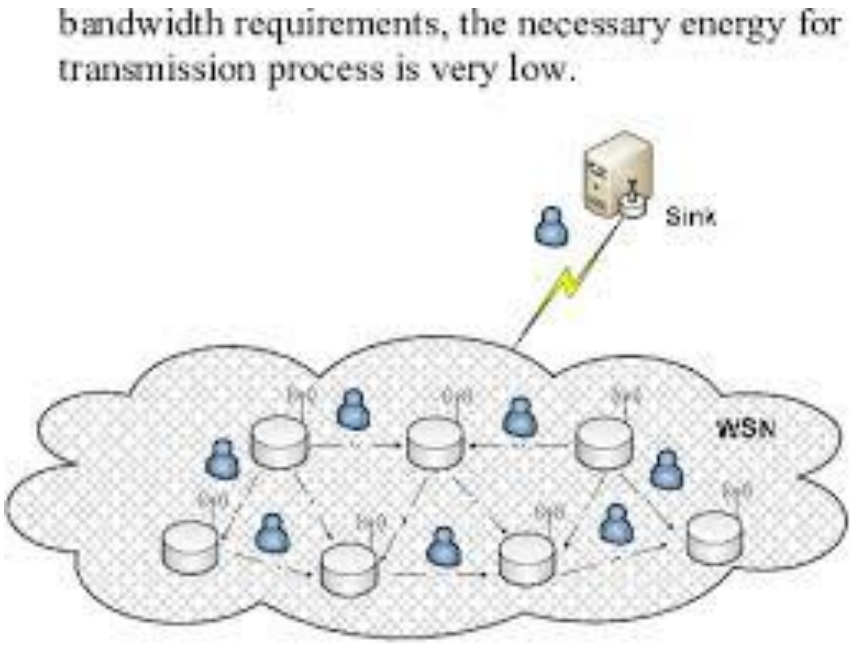


Рис. 3.2 -Модель взаємодії сенсорних вузлів та мобільного агента у безпроводовій сенсорній мережі [19]

На поданій схемі мобільний агент послідовно відвідує сенсорні вузли мережі, отримуючи від них вимірювальні дані, виконуючи фільтрацію та агрегацію інформації, після чого передає узагальнені результати до пункту обробки. При цьому маршрути

міграції можуть змінюватися залежно від стану радіоканалу, енергетичних ресурсів вузлів і поточної мережевої ситуації.

Важливою перевагою розглянутої моделі взаємодії є зменшення ролі центрального вузла керування. Більшість обчислювальних операцій переноситься безпосередньо в мережу, що дозволяє уникнути перевантаження окремих елементів системи та підвищити її відмовостійкість. У разі виходу з ладу одного або кількох вузлів мобільний агент може адаптувати маршрут і продовжити виконання завдання без втрати критичних даних.

Крім того, така модель взаємодії створює передумови для реалізації інтелектуальних функцій на рівні мобільних агентів. Агент може аналізувати історію вимірювань, порівнювати дані сусідніх вузлів, виявляти аномалії та приймати рішення щодо пріоритетності збору інформації. Це особливо актуально для систем моніторингу, що працюють у реальному часі або в умовах обмежених ресурсів [2].

Таблиця 3.1 Моделі взаємодії сенсорних вузлів і мобільних агентів [2]

Модель взаємодії	Характеристика	Переваги	Обмеження
Клієнт-агентна	Агент ініціює збір даних з вузлів	Низький трафік, проста реалізація	Збільшення часу обходу
Подієво-орієнтована	Активація агента при виникненні події	Оперативність, економія енергії	Не підходить для безперервного моніторингу
Кооперативна	Кілька агентів працюють паралельно	Висока масштабованість	Потребує координації
Адаптивна	Динамічна зміна маршруту агента	Стійкість до змін топології	Складніша логіка керування

Наведені в табл. 3.1 моделі взаємодії сенсорних вузлів і мобільних агентів демонструють різні підходи до організації збору та обробки даних у безпроводових сенсорних мережах. Вибір конкретної моделі залежить від умов експлуатації мережі,

вимог до оперативності отримання інформації, доступних обчислювальних ресурсів та рівня динамічності середовища.

Для систем із періодичним збором даних доцільним є застосування клієнт-агентної або адаптивної моделей, які забезпечують збалансоване використання ресурсів мережі. У разі необхідності швидкого реагування на критичні події більш ефективною є подієво-орієнтована модель, що дозволяє мінімізувати затримки та зменшити енергоспоживання сенсорних вузлів.

Кооперативні моделі взаємодії є перспективними для великих та масштабованих сенсорних мереж, оскільки дозволяють розподіляти навантаження між кількома мобільними агентами та скорочувати загальний час збору інформації.

Окрему увагу в межах моделей взаємодії слід приділити механізмам ініціалізації та завершення роботи мобільних агентів. У практичних реалізаціях агент може запускатися як централізовано з пункту обробки, так і децентралізовано — безпосередньо на одному з сенсорних вузлів мережі. Децентралізований запуск є особливо доцільним у динамічних середовищах, де зв’язок із центральним вузлом може бути нестабільним або тимчасово відсутнім. Після завершення циклу збору даних агент або передає результати до пункту обробки, або зберігає їх локально до моменту відновлення зв’язку.

Важливим аспектом моделей взаємодії є синхронізація дій між сенсорними вузлами та мобільними агентами. У асинхронних мережах вузли можуть перебувати у різних режимах роботи, включаючи активний стан, режим очікування або глибокий сон. Мобільний агент повинен враховувати ці режими, коригуючи час відвідування вузлів або ініціюючи їх активацію лише за необхідності. Такий підхід дозволяє додатково знизити енергоспоживання та уникнути зайвих пробуджень сенсорних вузлів [17].

У рамках моделей взаємодії також розглядається питання обміну службовою інформацією. Окрім вимірювальних даних, сенсорні вузли можуть передавати мобільним агентам інформацію про рівень заряду батареї, якість радіоканалу, кількість сусідів та поточне навантаження. На основі цих даних агент формує уявлення про стан мережі та приймає рішення щодо подальшого маршруту міграції або зміни стратегії збору інформації. Це дозволяє реалізувати контекстно-залежну взаємодію, що є ключовою для динамічних сенсорних мереж.

Особливу роль у моделях взаємодії відіграє механізм обробки помилок та аномальних ситуацій. У разі виявлення некоректних або різко відмінних значень параметрів мобільний агент може ініціювати повторне зчитування даних, звернутися до сусідніх вузлів для порівняння результатів або позначити відповідний вузол як потенційно несправний. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність даних і зменшити вплив похибок вимірювань на результати моніторингу.

У динамічних сенсорних мережах доцільним є поєднання кількох моделей взаємодії в межах однієї системи. Наприклад, у нормальному режимі роботи може використовуватися клієнт-агентна або адаптивна модель для періодичного збору даних, тоді як у разі виникнення критичних подій активується подієво-орієнтована модель. Така гібридна взаємодія забезпечує баланс між енергоефективністю та оперативністю реагування [10].

З точки зору масштабування системи, моделі взаємодії повинні забезпечувати можливість розширення мережі без істотної деградації продуктивності. У великих сенсорних мережах доцільно застосовувати ієрархічні моделі, де мобільні агенти взаємодіють не з усією мережею, а з окремими кластерами вузлів. У цьому випадку кожен агент обслуговує певну область мережі, що дозволяє локалізувати процес збору даних і зменшити загальну складність системи.

Крім того, моделі взаємодії сенсорних вузлів і мобільних агентів повинні враховувати вимоги безпеки та захисту інформації. Агент, що мігрує мережею, повинен мати механізми автентифікації та контролю доступу до ресурсів вузла. У свою чергу, сенсорні вузли мають перевіряти цілісність і легітимність агента перед наданням доступу до даних. Реалізація таких механізмів є важливою умовою використання агентних технологій у критичних системах.

Таким чином, моделі взаємодії сенсорних вузлів і мобільних агентів є фундаментальним елементом побудови ефективних безпроводових сенсорних мереж у динамічних умовах. Вони визначають спосіб організації збору, обробки та передачі даних, впливають на енергоефективність, надійність і масштабованість системи. Застосування адаптивних, кооперативних та гібридних моделей взаємодії дозволяє максимально використати потенціал мобільних агентів і забезпечити стабільну роботу сенсорної мережі за умов постійних змін середовища [21].

3.3 Адаптивні методи маршрутизації та передачі даних

У динамічних безпроводових сенсорних мережах маршрутизація та передача даних є одними з ключових процесів, що безпосередньо впливають на енергоефективність, надійність і швидкодію всієї системи. На відміну від статичних мереж, у яких маршрути можуть бути визначені заздалегідь, у змінних середовищах необхідно використовувати адаптивні методи, здатні реагувати на зміни топології, якості радіоканалу та стану сенсорних вузлів.

Адаптивна маршрутизація передбачає динамічний вибір маршрутів передачі даних на основі поточної інформації про мережу. До основних параметрів, які враховуються під час прийняття рішень, належать залишковий енергетичний ресурс вузлів, рівень сигналу, затримки передачі, кількість сусідніх вузлів та ймовірність відмови елементів мережі. Такий підхід дозволяє уникати перевантаження окремих ділянок мережі та продовжувати її життєвий цикл [9].

У контексті використання мобільних агентів адаптивні методи маршрутизації набувають особливого значення. Мобільний агент може самостійно визначати оптимальний маршрут міграції між сенсорними вузлами, змінюючи його залежно від умов середовища. При цьому передача даних здійснюється не шляхом багаторазової ретрансляції пакетів, а через фізичне переміщення агента, що дозволяє суттєво зменшити мережевий трафік.

Одним із поширених підходів є використання енергоорієнтованих алгоритмів, у яких пріоритет надається маршрутам із мінімальними витратами енергії. Такі алгоритми дозволяють рівномірно розподіляти навантаження між вузлами та запобігати передчасному виходу з ладу окремих елементів мережі. У поєднанні з мобільними агентами енергоорієнтована маршрутизація забезпечує більш ефективне використання ресурсів у довготривалих системах моніторингу.

Іншим напрямом є контекстно-орієнтована маршрутизація, за якої вибір маршруту залежить від типу даних, їхньої пріоритетності та вимог до затримок. Наприклад, критичні повідомлення можуть передаватися найкоротшими або найнадійнішими маршрутами, тоді як некритичні дані обробляються мобільними агентами з використанням більш енергоощадних стратегій [11].

Важливою перевагою адаптивних методів є їх здатність до самоорганізації. У разі зміни умов середовища або появи нових вузлів мережа автоматично перебудовує маршрути передачі даних без необхідності централізованого керування. Це особливо актуально для великих сенсорних мереж, що працюють у складних або важкодоступних умовах.

Таким чином, адаптивні методи маршрутизації та передачі даних у поєднанні з мобільними агентами дозволяють підвищити стійкість, енергоефективність і масштабованість безпроводових сенсорних мереж, забезпечуючи їх ефективне функціонування у динамічних середовищах.

Таблиця 3.2 Характеристика адаптивних методів маршрутизації [5]

Метод маршрутизації	Основний принцип	Переваги	Обмеження
Енергоорієнтований	Вибір маршрутів з мінімальними витратами енергії	Подовження часу життя мережі	Можливе збільшення затримок
Контекстно-орієнтований	Урахування типу та пріоритету даних	Гнучке управління трафіком	Підвищена складність реалізації
Локально-адаптивний	Використання інформації про сусідні вузли	Швидка реакція на зміни	Обмежена глобальна оптимальність
Агентно-орієнтований	Міграція мобільних агентів замість пакетної передачі	Зменшення трафіку, енергоефективність	Залежність від стратегії агента
Ієрархічний	Передача даних через кластери	Масштабованість, зменшення навантаження	Необхідність вибору головних вузлів

Таким чином, адаптивні методи маршрутизації та передачі даних у поєднанні з мобільними агентами дозволяють підвищити стійкість, енергоефективність і масштабованість безпроводових сенсорних мереж, забезпечуючи їх ефективне функціонування у динамічних середовищах.

Наведена табл. 3.2 демонструє, що адаптивні методи маршрутизації відрізняються за підходами до прийняття рішень і ступенем складності реалізації. Класичні енергоорієнтовані та ієрархічні методи добре підходять для стабільних або помірно динамічних мереж, де основним критерієм є збереження енергетичних ресурсів сенсорних вузлів.

У той же час агентно-орієнтовані методи маршрутизації є найбільш перспективними для середовищ з високою динамічністю, оскільки вони дозволяють відмовитися від постійної пакетної передачі даних і перенести обчислювальні операції безпосередньо в мережу. Мобільні агенти можуть адаптувати свої маршрути,

враховуючи поточний стан вузлів, що забезпечує більш гнучке управління процесом збору інформації [5].

Комбінація адаптивних методів маршрутизації з використанням мобільних агентів створює умови для побудови самоорганізованих сенсорних мереж, здатних ефективно функціонувати за обмежених ресурсів і в умовах постійних змін. Такий підхід є доцільним для систем довготривалого моніторингу, де надійність і енергоефективність мають вирішальне значення.

Отже, адаптивні методи маршрутизації та передачі даних є необхідною складовою сучасних безпроводових сенсорних мереж, що функціонують у динамічних середовищах. Їх поєднання з технологіями мобільних агентів дозволяє не лише оптимізувати використання енергетичних ресурсів, але й підвищити надійність збору інформації, зменшити мережевий трафік та забезпечити гнучку реакцію системи на зміну умов функціонування. Це створює передумови для реалізації ефективних, масштабованих і стійких сенсорних мереж, здатних забезпечувати якісний моніторинг у складних та змінних умовах експлуатації.

Важливим напрямом розвитку адаптивних методів маршрутизації є використання багатокритеріальних алгоритмів прийняття рішень. У таких підходах маршрут або стратегія передачі даних обирається не за одним параметром, а на основі сукупності критеріїв, серед яких енергоспоживання, затримка передачі, надійність каналу, ступінь завантаженості вузлів та важливість інформації. Багатокритеріальна оптимізація дозволяє знаходити компромісні рішення, які забезпечують стабільну роботу мережі в умовах змінної топології та обмежених ресурсів [7].

У динамічних сенсорних мережах значну роль відіграють механізми прогнозування стану мережі. Адаптивні алгоритми можуть використовувати історичні дані про зміну топології, рівень сигналу або енергоспоживання вузлів для прогнозування майбутнього стану мережі. На основі таких прогнозів система здатна заздалегідь перебудовувати маршрути або змінювати стратегії передачі даних, зменшуючи ймовірність втрат інформації та раптових відмов.

Особливе місце серед адаптивних методів займають алгоритми з використанням локальної інформації. У таких підходах кожен сенсорний вузол або мобільний агент приймає рішення на основі даних про найближче оточення, не потребуючи глобального знання структури мережі. Це значно знижує службовий трафік і дозволяє швидко реагувати на локальні зміни, що є критично важливим у великих або швидкозмінних мережах.

У поєднанні з мобільними агентами локально-адаптивні методи набувають додаткових переваг. Агент може накопичувати локальну інформацію з різних вузлів і формувати узагальнене уявлення про стан певної ділянки мережі. Це дозволяє коригувати маршрут міграції, вибирати найбільш енергоефективні вузли для обробки даних та уникати перевантажених або нестабільних ділянок мережі [9].

Ще одним перспективним напрямом є застосування ієрархічних адаптивних методів маршрутизації. У таких системах мережа поділяється на кластери, в межах яких використовуються локальні алгоритми маршрутизації, тоді як міжкластирна передача даних здійснюється через спеціалізовані вузли або мобільних агентів. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг глобального трафіку, підвищити масштабованість системи та ефективніше використовувати енергетичні ресурси.

Агентно-орієнтована маршрутизація також відкриває можливості для реалізації інтелектуальних стратегій передачі даних. Мобільні агенти можуть змінювати поведінку залежно від типу задачі, наприклад, переходити від режиму періодичного збору даних до режиму пріоритетної обробки подій. У таких випадках агент надає перевагу вузлам, що зафіксували критичні зміни параметрів, і мінімізує час доставки важливої інформації.

У сучасних дослідженнях також розглядається інтеграція адаптивних методів маршрутизації з алгоритмами машинного навчання. Такі підходи дозволяють системі самостійно навчатися оптимальним стратегіям передачі даних на основі накопиченого досвіду. Наприклад, агент може поступово визначати найбільш стабільні маршрути, прогнозувати відмови вузлів або оптимізувати порядок обходу сенсорів. Це особливо

актуально для довготривалих систем моніторингу, що функціонують у складних і непередбачуваних умовах.

Не менш важливим є питання надійності передачі даних. Адаптивні методи маршрутизації дозволяють реалізувати механізми резервування маршрутів, дублювання критичних повідомлень або повторного збору інформації у разі втрати даних. У поєднанні з мобільними агентами такі механізми забезпечують високу ймовірність доставки важливої інформації навіть за умов часткових відмов мережі [13].

Таким чином, адаптивні методи маршрутизації та передачі даних є невід'ємною складовою ефективного функціонування безпроводових сенсорних мереж у динамічних середовищах. Вони дозволяють системі гнучко реагувати на зміни топології, оптимізувати використання енергетичних ресурсів і забезпечувати надійну доставку інформації. Поєднання таких методів із технологіями мобільних агентів створює основу для побудови самоорганізованих, інтелектуальних та масштабованих сенсорних мереж, здатних ефективно виконувати завдання моніторингу в складних і змінних умовах експлуатації.

3.4 Алгоритми узгодження і калібрування даних

Для підвищення достовірності вимірювань у безпроводових сенсорних мережах застосовуються алгоритми узгодження та калібрування, які дозволяють компенсувати вплив шумів, дрейфу параметрів сенсорів і зовнішніх факторів. Загальний процес узгодження і калібрування даних передбачає збір вимірювань із групи сенсорних вузлів, аналіз їх взаємної узгодженості, виявлення відхилень та корекцію результатів на основі статистичних або адаптивних методів (Рис. 3.3) [10].

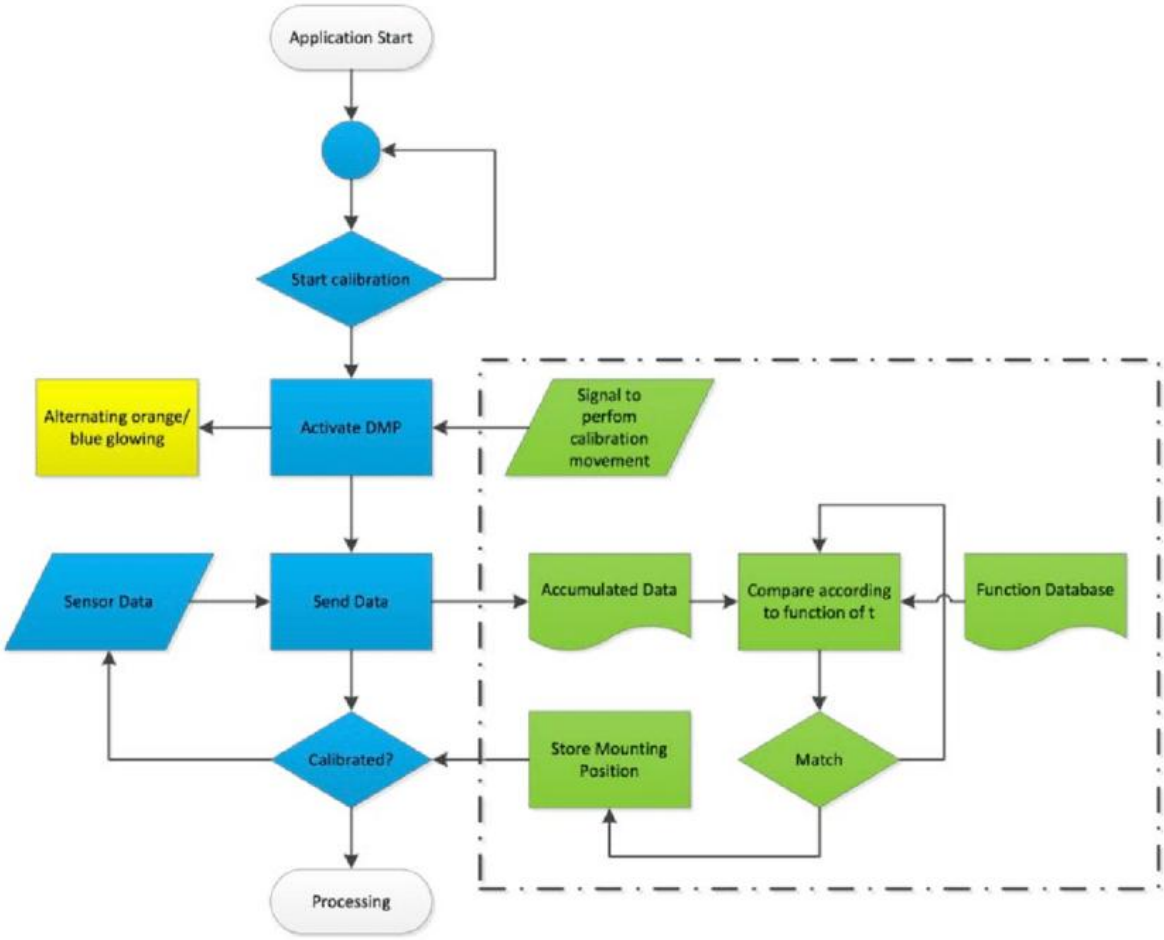


Рис. 3.3 - Процес узгодження та калібрування даних у безпроводовій сенсорній мережі [10]

На поданій схемі мобільний агент здійснює обхід сенсорних вузлів, збирає результати вимірювань, виконує їх порівняльний аналіз і формує скориговані значення параметрів. У разі виявлення систематичних відхилень агент ініціює процедуру калібрування, що дозволяє зменшити похибку вимірювань без залучення централізованого керування.

Одним із ключових елементів таких алгоритмів є використання локальної взаємної кореляції даних, отриманих від сусідніх вузлів. Це дозволяє виявляти аномальні значення та виключати некоректні вимірювання ще на рівні сенсорної мережі, зменшуючи обсяг помилкової інформації, що передається до пункту обробки.

Таблиця 3.3 Методи узгодження і калібрування даних у сенсорних мережах [2]

Метод	Принцип роботи	Переваги	Обмеження
Статистичне усереднення	Усереднення даних групи вузлів	Простота, низька обчислювальна складність	Низька чутливість до локальних змін
Фільтрація шумів	Усунення випадкових завад	Підвищення точності вимірювань	Потребує налаштування параметрів
Виявлення викидів	Пошук аномальних значень	Захист від помилкових даних	Залежність від порогів
Адаптивне калібрування	Динамічна корекція параметрів сенсорів	Компенсація дрейфу	Вища складність реалізації
Агентно-орієнтоване	Локальна обробка мобільними агентами	Енергоефективність, автономність	Залежність від стратегії агента

З аналізу табл. 3.3 видно, що найбільш ефективними для динамічних сенсорних мереж є адаптивні та агентно-орієнтовані методи калібрування. Вони дозволяють виконувати корекцію даних у реальному часі та зменшувати навантаження на мережеву інфраструктуру. Поєднання статистичних методів із мобільними агентами забезпечує компроміс між точністю вимірювань і витратами ресурсів.

Таким чином, використання мобільних агентів у процесах узгодження та калібрування даних дозволяє значно підвищити якість інформації, забезпечити адаптивність сенсорної мережі та продовжити термін її автономної роботи в умовах змінного середовища.

Важливою особливістю алгоритмів узгодження і калібрування даних у динамічних сенсорних мережах є необхідність їх безперервного функціонування протягом усього життєвого циклу системи. На відміну від статичних вимірювальних систем, де калібрування може виконуватися періодично або вручну, у безпроводових сенсорних мережах параметри сенсорів змінюються постійно під впливом умов

експлуатації. Тому алгоритми корекції повинні бути інтегровані безпосередньо в процес збору даних і працювати в автоматичному режимі [2].

Особливу роль у цьому відіграє розподілений характер обробки інформації. Замість передачі всіх сирих вимірювань до центрального пункту, корекція та узгодження виконуються локально на рівні сенсорних вузлів або мобільних агентів. Це дозволяє зменшити затримки, знизити обсяг передаваних даних та уникнути накопичення похибок, які можуть виникати під час багаторазової ретрансляції інформації.

У складних динамічних середовищах доцільним є використання комбінованих алгоритмів, що поєднують статистичні методи узгодження з адаптивними механізмами калібрування. Такий підхід дозволяє враховувати як короткочасні випадкові відхилення, так і довготривалий дрейф параметрів сенсорів. Мобільні агенти при цьому виконують роль інтелектуальних посередників, які накопичують історію вимірювань, аналізують тенденції змін і приймають рішення щодо необхідності корекції.

Ще одним важливим аспектом є вплив алгоритмів калібрування на енергоспоживання мережі. Надмірно складні методи можуть призводити до зростання обчислювальних витрат і скорочення часу автономної роботи вузлів. Тому при проєктуванні систем узгодження даних необхідно знаходити компроміс між точністю вимірювань і витратами ресурсів. Агентно-орієнтований підхід дозволяє ефективно реалізувати такий компроміс за рахунок гнучкого розподілу обчислювального навантаження.

Таким чином, алгоритми узгодження і калібрування даних у поєднанні з мобільними агентами формують інтелектуальний рівень безпроводової сенсорної мережі, який забезпечує високу якість інформації, адаптивність до змін середовища та стабільність роботи системи в довготривалій перспективі.

Важливим напрямом розвитку алгоритмів узгодження та калібрування є врахування просторово-часових характеристик вимірювань. У сенсорних мережах

дані, отримані від фізично близьких вузлів, як правило, мають високу кореляцію, тоді як різкі відхилення можуть свідчити про локальні збої, несправність сенсора або вплив зовнішніх перешкод. Використання цієї властивості дозволяє підвищити точність виявлення аномалій і зменшити ймовірність хибної корекції даних.

У динамічних сенсорних мережах, де вузли можуть змінювати положення або тимчасово втрачати зв’язок, особливо актуальними є алгоритми калібрування, що не потребують фіксованого набору опорних сенсорів. Мобільні агенти можуть виконувати роль рухомих еталонів, порівнюючи показники різних вузлів у процесі міграції та формуючи узгоджені значення на основі статистичного аналізу. Такий підхід зменшує залежність від окремих вузлів і підвищує стійкість системи до відмов [6].

Окрему увагу слід приділити часовому аспекту калібрування. У багатьох практичних застосуваннях важливо не лише усунути похибку вимірювань, але й відстежувати її зміну в часі. Для цього застосовуються рекурсивні алгоритми, які поступово коригують параметри сенсорів на основі накопичених даних. Мобільні агенти можуть зберігати історію вимірювань і використовувати її для побудови моделей дрейфу параметрів, що дозволяє прогнозувати майбутні відхилення та завчасно вживати коригувальних заходів.

У контексті агентно-орієнтованого підходу можливе застосування фільтраційних методів, зокрема фільтрів Калмана та їх модифікацій. Такі алгоритми дозволяють оцінювати істинне значення вимірюваного параметра на основі зашумлених даних і поступово уточнювати оцінку з надходженням нових вимірювань. Реалізація фільтрації безпосередньо мобільним агентом дає змогу уникнути централізованої обробки та зменшити затримки у прийнятті рішень.

Ще одним перспективним напрямом є використання адаптивних порогових механізмів для виявлення аномалій. На відміну від фіксованих порогів, адаптивні алгоритми враховують поточний стан мережі, рівень шуму та варіацію вимірювань. Мобільні агенти можуть динамічно змінювати пороги виявлення викидів залежно від

умов середовища, що підвищує точність діагностики та зменшує кількість хибних спрацювань.

Важливим аспектом є також узгодження даних між різними часовими інтервалами. У системах тривалого моніторингу показники, отримані в різні моменти часу, можуть бути неузгодженими через зміну умов вимірювання або параметрів сенсорів. Алгоритми часової узгодженості дозволяють нормалізувати дані та забезпечити їх порівнянність у довгостроковій перспективі. Мобільні агенти, які періодично відвідують ті самі вузли, можуть виконувати таку нормалізацію безпосередньо в мережі [12].

У практичних реалізаціях часто застосовується комбінація декількох методів узгодження та калібрування. Наприклад, первинна фільтрація шумів може поєднуватися з виявленням викидів і подальшим адаптивним калібруванням. Такий багаторівневий підхід дозволяє поступово покращувати якість даних на різних етапах обробки та зменшувати вплив як випадкових, так і систематичних похибок.

У практичних реалізаціях часто застосовується комбінація декількох методів узгодження та калібрування. Наприклад, первинна фільтрація шумів може поєднуватися з виявленням викидів і подальшим адаптивним калібруванням. Такий багаторівневий підхід дозволяє поступово покращувати якість даних на різних етапах обробки та зменшувати вплив як випадкових, так і систематичних похибок.

Слід також враховувати вплив алгоритмів калібрування на загальну продуктивність мережі. Часте виконання корекцій може призводити до збільшення обчислювального навантаження та енергоспоживання. Тому доцільним є використання подієво-орієнтованих механізмів, за яких калібрування ініціюється лише у разі виявлення суттєвих відхилень або деградації якості даних. Мобільні агенти можуть самостійно визначати момент запуску процедур корекції, спираючись на аналіз локальних і глобальних показників [1].

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ З МОБІЛЬНИМИ АГЕНТАМИ

4.1 Архітектура системи збору даних з мобільними агентами

Загальна архітектура системи збору даних з мобільними агентами може бути подана у вигляді багаторівневої структури, що включає сенсорні вузли, рівень мобільних агентів та центральний пункт обробки даних. Така організація дозволяє розподілити функції збору, попередньої обробки та аналізу інформації між різними компонентами системи, підвищуючи її гнучкість і стійкість (Рис. 4.1) [30].

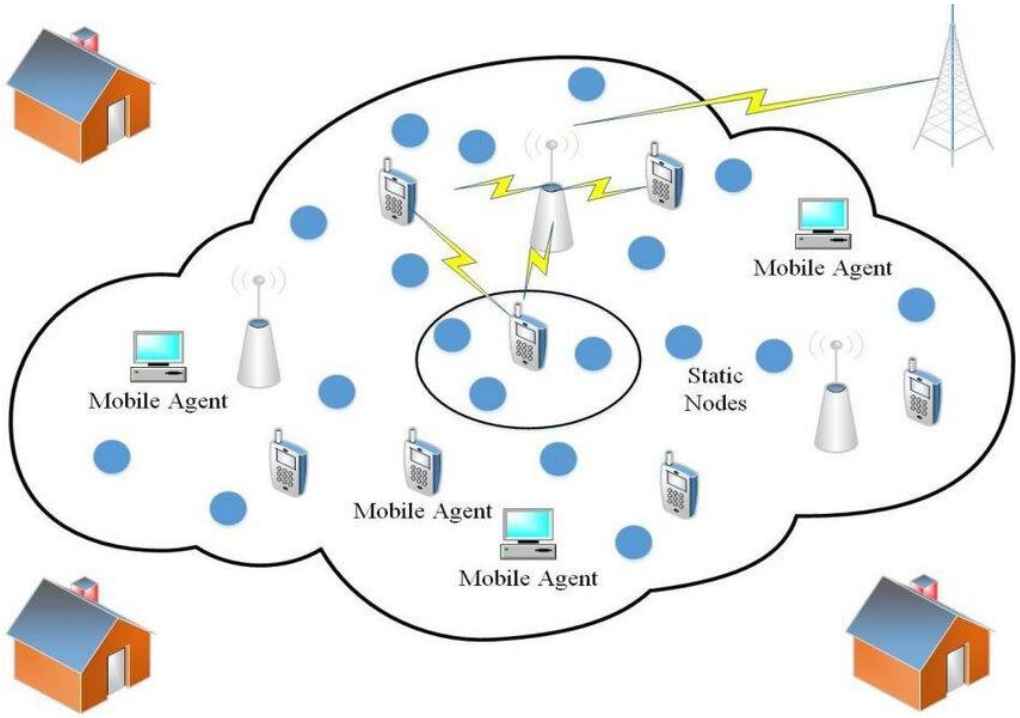


Рис. 4.1 - Архітектура системи збору даних у безпроводовій сенсорній мережі [30]

На поданій архітектурній схемі сенсорні вузли виконують вимірювання параметрів середовища та зберігають первинні дані. Мобільні агенти здійснюють міграцію між вузлами, виконують локальну обробку та агрегацію інформації, після

чого передають узагальнені результати до пункту обробки. Центральний вузол використовується для зберігання, візуалізації та подальшого аналізу даних.

Для кращого розуміння функціонування системи доцільно розглянути узагальнену схему взаємодії компонентів під час збору даних мобільним агентом (Рис. 4.2) [31].

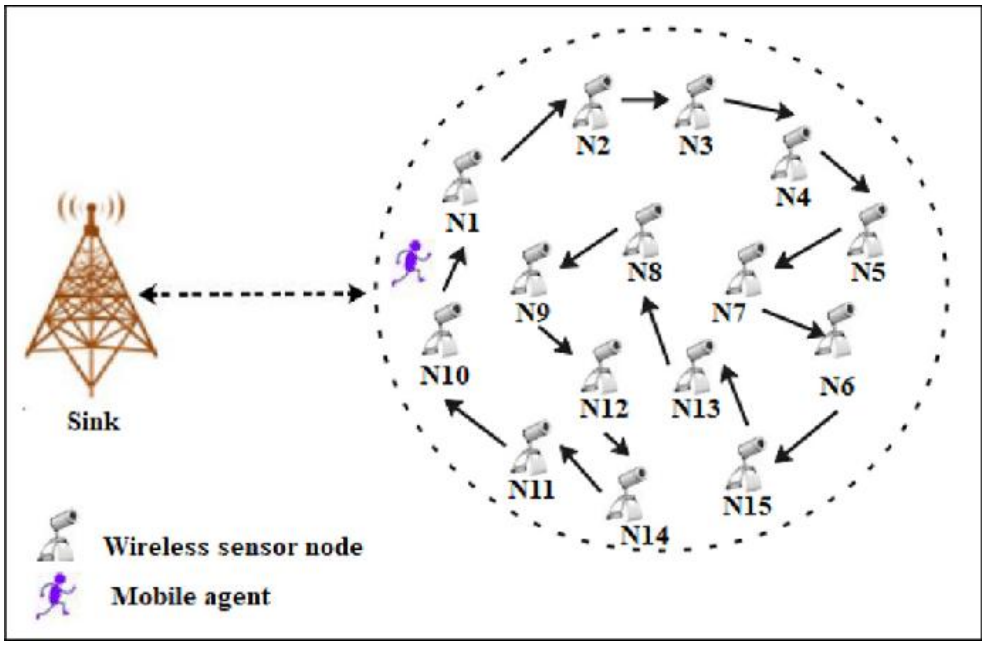


Рис. 4.2 - Схема функціонування системи збору даних з мобільним агентом [31]

Згідно зі схемою, мобільний агент ініціюється в мережі, визначає маршрут міграції, послідовно відвідує сенсорні вузли, збирає та обробляє дані, а після завершення обходу передає агреговану інформацію до пункту обробки. У разі зміни умов середовища агент може динамічно коригувати маршрут або алгоритм обробки даних.

Крім того, мобільний агент може враховувати поточний стан сенсорних вузлів, зокрема рівень залишкової енергії, завантаженість обчислювальних ресурсів та якість радіозв’язку. Це дозволяє уникати відвідування перевантажених або критично ослаблених вузлів, забезпечуючи більш рівномірний розподіл навантаження в мережі та подовження її життєвого циклу [20].

Важливою особливістю функціонування мобільного агента є можливість автономної роботи в умовах часткової або повної втрати зв’язку з пунктом обробки даних. У таких ситуаціях агент продовжує виконувати завдання, накопичуючи результати вимірювань у локальній пам’яті, а передача агрегованої інформації здійснюється після відновлення з’єднання. Це підвищує стійкість системи до збоїв та робить її придатною для використання у важкодоступних або завадових середовищах.

Окрім збору та обробки даних, мобільні агенти можуть виконувати функції моніторингу стану мережі. Зокрема, вони здатні фіксувати факти відмов вузлів, зниження якості зв’язку або появи аномальних вимірювань, передаючи цю інформацію до пункту керування. На основі таких даних можуть прийматися рішення щодо перебудови структури мережі або зміни параметрів її функціонування.

Таким чином, застосування мобільних агентів у системі збору даних забезпечує не лише гнучку організацію передачі інформації, але й створює умови для реалізації інтелектуальних механізмів управління сенсорною мережею. Це підвищує ефективність, надійність та адаптивність системи в умовах змінного середовища. Основні компоненти архітектури системи збору даних, їх функціональне призначення та особливості реалізації наведено в табл. 4.1, що дозволяє наочно оцінити роль кожного елемента у забезпеченні стабільної роботи мережі [3].

Таблиця 4.1 Основні компоненти архітектури системи збору даних [3]

Компонент системи	Функціональне призначення	Особливості реалізації
Сенсорний вузол	Вимірювання параметрів середовища	Обмежені ресурси, автономне живлення
Мобільний агент	Збір і локальна обробка даних	Міграція, автономність
Радіоканал	Передача даних і агентів	Нестабільність, завади
Пункт обробки	Зберігання та аналіз інформації	Мінімальна участь у керуванні
Система керування	Налаштування параметрів мережі	Адаптація до змін середовища

Архітектура системи збору даних з мобільними агентами будується з урахуванням вимог до масштабованості, енергоефективності та стійкості до змін топології мережі. Центральним елементом такої архітектури є сенсорні вузли, які виконують функції вимірювання параметрів середовища та первинної підготовки даних. Кожен вузол здатний взаємодіяти з мобільними агентами, надаючи їм доступ до локально збереженої інформації та обчислювальних ресурсів.

Мобільні агенти реалізуються у вигляді програмних модулів, що можуть динамічно переміщуватися між вузлами мережі відповідно до обраної стратегії міграції. Вони виконують функції збору, фільтрації, агрегації та попереднього аналізу даних безпосередньо на вузлах, що дозволяє значно зменшити обсяг передаваного мережевого трафіку та скоротити затримки передачі інформації. Такий підхід особливо ефективний у великих або розподілених сенсорних мережах, де пряме передавання всіх вимірювань до центрального пункту є енергетично невигідним.

Координація роботи агентів може здійснюватися як централізовано, так і децентралізовано, залежно від особливостей конкретної системи. У динамічних умовах перевага надається децентралізованим механізмам управління, які дозволяють агентам автономно приймати рішення щодо маршруту міграції, частоти опитування вузлів та обсягу зібраних даних. Це забезпечує підвищення живучості системи та зменшення залежності від окремих вузлів керування.

Таким чином, архітектура системи збору даних з використанням мобільних агентів створює гнучке та адаптивне середовище, здатне ефективно функціонувати в умовах обмежених ресурсів та постійних змін структури безпроводової сенсорної мережі.

Важливим аспектом архітектури системи збору даних з мобільними агентами є чітке розмежування функціональних рівнів і відповідальностей між компонентами. Сенсорні вузли зосереджені на виконанні базових операцій вимірювання та збереження даних, тоді як складніші обчислювальні та аналітичні функції переносяться на рівень мобільних агентів або пункту обробки. Такий розподіл

дозволяє оптимально використовувати обмежені ресурси сенсорних вузлів і зменшити їх енергетичне навантаження.

Архітектура системи передбачає можливість гнучкого налаштування поведінки мобільних агентів залежно від сценарію застосування. Зокрема, можуть змінюватися частота міграції агентів, кількість вузлів, що відвідуються за один цикл, а також алгоритми локальної обробки даних. Це дозволяє адаптувати систему як до режимів безперервного моніторингу, так і до подієво-орієнтованих сценаріїв, у яких збір даних активується лише у разі виникнення критичних ситуацій [5].

Ще однією важливою складовою архітектури є механізми обміну службовою інформацією між мобільними агентами та сенсорними вузлами. До такої інформації належать відомості про рівень заряду батареї, стан радіоканалу, наявність помилок вимірювань або перевантаження обчислювальних ресурсів. Використання цих даних дозволяє агентам приймати обґрунтовані рішення щодо маршруту міграції та обсягу виконуваних операцій, що позитивно впливає на стабільність функціонування всієї системи.

Архітектура також передбачає можливість масштабування без суттєвих змін у структурі системи. Додавання нових сенсорних вузлів або агентів не потребує централізованого переналаштування всієї мережі, оскільки мобільні агенти автоматично враховують появу нових елементів під час міграції. Це робить запропоновану архітектуру придатною для використання у великих і географічно розподілених сенсорних мережах.

З точки зору надійності, багаторівнева архітектура з мобільними агентами зменшує залежність системи від окремих компонентів. Вихід з ладу окремого сенсорного вузла або тимчасова втрата зв’язку не призводить до повного припинення збору даних, оскільки агенти можуть перебудовувати маршрути та використовувати альтернативні джерела інформації. Це забезпечує високу живучість системи в умовах динамічного середовища.

Крім того, запропонована архітектура створює передумови для інтеграції інтелектуальних методів аналізу даних. Мобільні агенти можуть бути доповнені модулями машинного навчання або адаптивними евристиками, які дозволяють оптимізувати процес збору інформації, виявляти закономірності у вимірюваннях та прогнозувати зміни стану середовища. Такий підхід підвищує цінність зібраних даних і розширює функціональні можливості сенсорної мережі.

Крім того, запропонована архітектура створює передумови для інтеграції інтелектуальних методів аналізу даних. Мобільні агенти можуть бути доповнені модулями машинного навчання або адаптивними евристиками, які дозволяють оптимізувати процес збору інформації, виявляти закономірності у вимірюваннях та прогнозувати зміни стану середовища. Такий підхід підвищує цінність зібраних даних і розширює функціональні можливості сенсорної мережі [4].

4.2. Імітаційне моделювання процесів у динамічному середовищі

Імітаційне моделювання є одним з найбільш ефективних методів дослідження безпроводових сенсорних мереж, оскільки дозволяє аналізувати їх поведінку в умовах, максимально наближених до реальних, без необхідності розгортання фізичної інфраструктури. Особливої актуальності цей підхід набуває для динамічних середовищ, де топологія мережі, умови передавання даних та стан сенсорних вузлів можуть змінюватися у часі.

Метою імітаційного моделювання в межах даної роботи є дослідження ефективності збору та обробки даних із використанням мобільних агентів за різних сценаріїв функціонування сенсорної мережі. Основна увага приділяється оцінці таких показників, як затримка доставки даних, обсяг мережевого трафіку, енергоспоживання вузлів та стійкість мережі до змін умов середовища.

Для проведення моделювання розглядається типова безпроводова сенсорна мережа, що складається з множини сенсорних вузлів, розподілених у двовимірному

просторі. Кожен вузол виконує функції вимірювання параметрів середовища, локального збереження даних та взаємодії з мобільними агентами. Загальна схема імітаційної моделі системи збору даних з мобільними агентами наведена на рис. 4.3 [3].

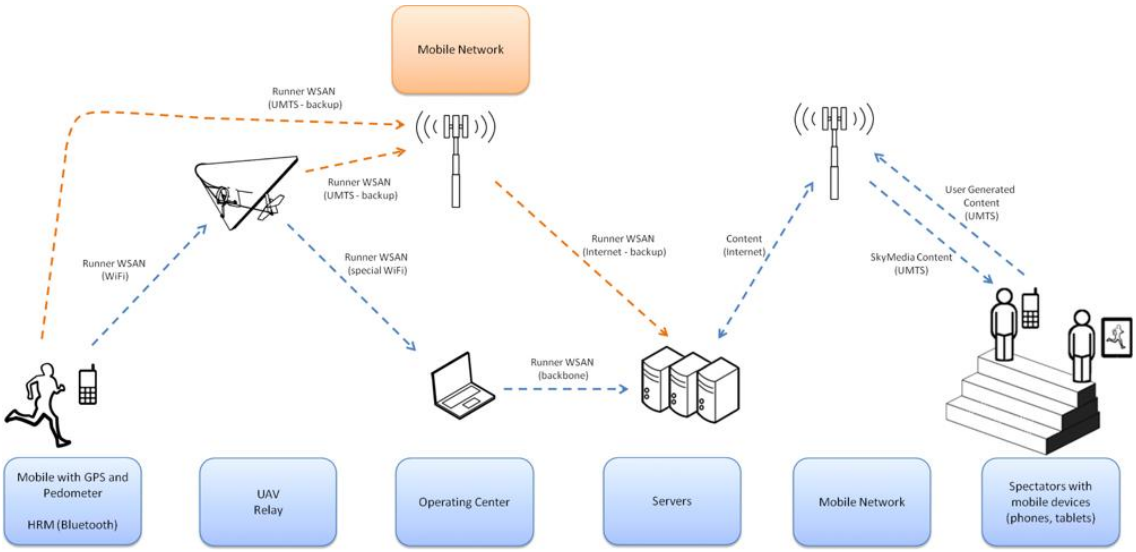


Рис. 4.3 - Структурна схема імітаційної моделі системи збору даних з мобільними агентами [3]

У моделі передбачено, що мобільний агент ініціюється у визначеному вузлі мережі або в центральному пункті збору даних. Після ініціалізації агент формує маршрут міграції, який може змінюватися в процесі роботи залежно від стану мережі, рівня енергоспоживання вузлів та актуальності зібраних даних. Під час відвідування сенсорних вузлів агент виконує збір вимірювань, їх первинну обробку та агрегацію, після чого передає узагальнену інформацію до пункту обробки.

Динамічність середовища в імітаційній моделі реалізується шляхом зміни таких параметрів, як доступність вузлів, рівень сигналу радіоканалу, швидкість передавання даних та залишковий енергетичний ресурс. Це дозволяє оцінити адаптивність мобільних агентів до змін топології мережі та нестабільних умов зв’язку.

Для аналізу ефективності різних сценаріїв моделювання використовуються кількісні показники, перелік яких наведено в табл. 4.2 [20].

Таблиця 4.2 Основні компоненти архітектури системи збору даних [20]

Показник	Опис
Затримка доставки даних	Час від моменту вимірювання до отримання даних у пункті обробки
Обсяг мережевого трафіку	Загальна кількість переданих пакетів у мережі
Енергоспоживання	Сумарні витрати енергії сенсорних вузлів
Повнота збору даних	Частка отриманих вимірювань від загальної кількості
Стійкість до відмов	Здатність мережі функціонувати при втраті вузлів

Результати моделювання показують, що використання мобільних агентів дозволяє суттєво зменшити обсяг передаваного трафіку порівняно з традиційною схемою прямої передачі даних до центрального вузла. Це пояснюється виконанням агрегації та фільтрації даних безпосередньо на сенсорних вузлах, що зменшує кількість повторюваної або малозначущої інформації.

На рис. 4.4 наведено залежність середнього енергоспоживання сенсорних вузлів від кількості активних агентів у мережі. Як видно з графіка, оптимальний вибір кількості агентів дозволяє досягти балансу між швидкістю збору даних та витратами енергоресурсів [21].

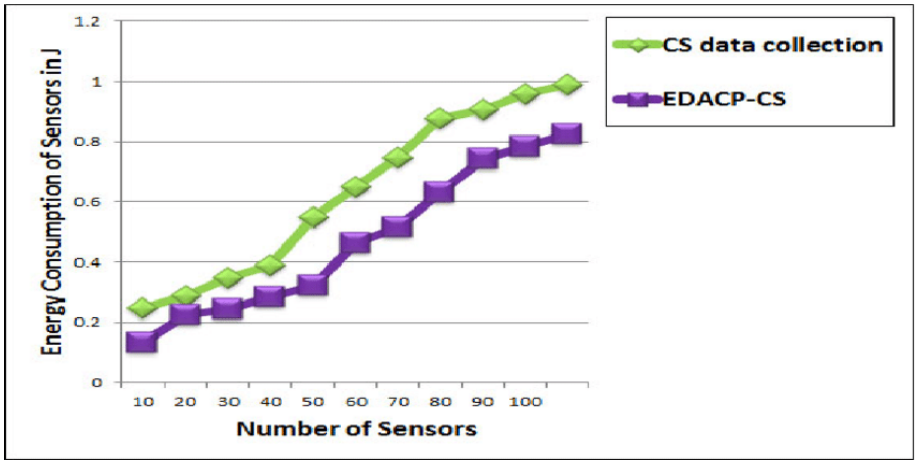


Рис. 4.4 – Залежність енергоспоживання сенсорних вузлів від кількості мобільних агентів [21]

На рис. 4.4 наведено залежність середнього енергоспоживання сенсорних вузлів від кількості активних агентів у мережі. Як видно з графіка, оптимальний вибір кількості агентів дозволяє досягти балансу між швидкістю збору даних та витратами енергоресурсів.

Крім того, імітаційне моделювання підтвердило, що мобільні агенти здатні ефективно адаптувати свої маршрути у разі виходу з ладу окремих вузлів або погіршення якості радіозв'язку. Це забезпечує збереження працездатності системи навіть у складних динамічних умовах, що є критично важливим для систем реального часу та моніторингу.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що імітаційне моделювання є доцільним інструментом для дослідження та оптимізації систем збору даних у безпроводових сенсорних мережах з мобільними агентами. Запропонована модель дозволяє оцінювати вплив різних параметрів середовища та алгоритмів роботи агентів на загальну ефективність мережі й може бути використана для подальшого вдосконалення архітектури системи [1].

Важливим результатом імітаційного моделювання є також оцінка впливу щільності розміщення сенсорних вузлів на ефективність роботи мобільних агентів. Зі збільшенням кількості вузлів у зоні покриття зростає складність маршрутизації та обсяг оброблюваної інформації, однак застосування агентного підходу дозволяє локалізувати процес збору даних і уникнути перевантаження мережі. Моделювання показало, що в мережах з високою щільністю вузлів мобільні агенти демонструють кращу масштабованість порівняно з традиційними схемами передачі, оскільки кількість радіопередач зростає значно повільніше.

Крім того, результати імітаційного моделювання засвідчили, що агентно-орієнтований підхід є більш стійким до часткових відмов мережі. Навіть за умови втрати значної частини сенсорних вузлів система з мобільними агентами зберігає працездатність за рахунок динамічної перебудови маршрутів і зміни стратегії збору

даних. Це дозволяє забезпечити безперервність моніторингу та підвищує надійність функціонування безпроводової сенсорної мережі в цілому.

Таким чином, проведене імітаційне моделювання підтверджує доцільність використання мобільних агентів у системах збору даних, що працюють у динамічних умовах. Отримані результати демонструють переваги агентного підходу з точки зору енергоефективності, адаптивності та стійкості до змін середовища, що робить його перспективним напрямом для побудови сучасних безпроводових сенсорних мереж [2].

4.3 Оцінка ефективності та надійності збору даних

Оцінка ефективності системи збору даних у безпроводових сенсорних мережах з мобільними агентами є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє визначити доцільність застосування запропонованих підходів у реальних умовах експлуатації. У рамках даного підрозділу аналізуються основні показники роботи системи, зокрема точність зібраних даних, рівень енергоспоживання сенсорних вузлів, надійність передачі інформації та стійкість мережі до змін топології.

Ефективність збору даних оцінювалася за такими критеріями: обсяг переданого трафіку, час доставки агрегованої інформації до центрального пункту обробки, а також рівень завантаження сенсорних вузлів. Використання мобільних агентів дозволило зменшити кількість прямих радіопередач між вузлами, що позитивно вплинуло на зниження загального мережевого трафіку та зменшення енергетичних витрат.

Надійність функціонування системи аналізувалася з урахуванням можливих відмов окремих вузлів, зміни умов середовища та порушення зв’язності мережі. Результати імітаційного моделювання показали, що мобільні агенти здатні адаптувати маршрути міграції та алгоритми збору даних у разі виникнення несприятливих умов, що забезпечує стабільну роботу системи навіть при частковій деградації мережі.

Особливу увагу було приділено оцінці точності зібраних вимірювань. Завдяки локальній обробці даних безпосередньо на сенсорних вузлах та можливості їх

попередньої фільтрації мобільними агентами вдалося зменшити вплив шумів і похибок вимірювання. Це сприяло підвищенню достовірності агрегованої інформації, що передається до пункту обробки [3].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що застосування мобільних агентів у системах збору даних безпроводових сенсорних мереж забезпечує підвищення ефективності, надійності та адаптивності функціонування мережі. Запропонований підхід є доцільним для використання у динамічних середовищах, де традиційні методи збору даних не забезпечують необхідного рівня стабільності та енергоефективності.

Крім того, було проведено порівняння роботи сенсорної мережі з використанням мобільних агентів та без їх застосування. Аналіз показав, що у випадку традиційної схеми збору даних спостерігається швидше виснаження енергоресурсів окремих вузлів, особливо тих, що розташовані поблизу пункту збору даних або виконують роль ретрансляторів. Використання мобільних агентів дозволяє рівномірніше розподілити навантаження між вузлами, що позитивно впливає на загальний життєвий цикл мережі.

Важливим показником ефективності також є масштабованість системи. Результати моделювання підтвердили, що зі збільшенням кількості сенсорних вузлів запропонований підхід не призводить до пропорційного зростання обсягу службового трафіку. Мобільні агенти здійснюють агрегацію даних безпосередньо в мережі, що знижує навантаження на канали зв’язку та забезпечує стабільну роботу системи навіть у великих за розміром мережах.

Оцінка стійкості системи до змін топології показала, що мобільні агенти здатні оперативно реагувати на появу нових вузлів, вихід з ладу існуючих елементів або тимчасову втрату зв’язку. За рахунок динамічного планування маршруту міграції агент може обходити недоступні вузли та продовжувати збір даних з мінімальними втратами інформації. Це є суттєвою перевагою у порівнянні з фіксованими схемами маршрутизації.

Отримані результати підтверджують доцільність використання мобільних агентів у безпроводових сенсорних мережах, що функціонують у динамічних умовах. Поєднання локальної обробки даних, адаптивної міграції агентів та зменшення обсягу переданого трафіку дозволяє підвищити ефективність збору інформації та забезпечити надійність функціонування системи в цілому.

Крім того, проведене дослідження показало, що використання мобільних агентів створює передумови для реалізації більш гнучких і інтелектуальних стратегій управління процесом збору даних. На відміну від статичних схем, де маршрути передачі визначаються заздалегідь і погано адаптуються до змін середовища, мобільні агенти здатні приймати рішення безпосередньо під час функціонування мережі. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни топології, появу нових вузлів або вихід з ладу окремих елементів [7].

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість зменшення впливу локальних відмов на загальну працездатність мережі. У традиційних безпроводових сенсорних мережах відмова одного або декількох вузлів може призвести до втрати значної частини інформації або порушення зв’язності. У системах з мобільними агентами така проблема частково нівелюється за рахунок здатності агентів змінювати маршрут міграції та використовувати альтернативні шляхи збору даних.

Окремої уваги заслуговує питання достовірності вимірювань. Завдяки можливості локального аналізу даних мобільні агенти можуть виявляти аномальні значення, що виникають унаслідок збоїв сенсорів, зовнішніх завад або деградації обладнання. Порівняння даних, отриманих із сусідніх вузлів, дозволяє підвищити якість інформації ще на етапі збору, зменшуючи навантаження на центральний пункт обробки.

Застосування мобільних агентів також позитивно впливає на масштабованість системи. У разі збільшення кількості сенсорних вузлів або розширення зони моніторингу немає необхідності суттєво змінювати архітектуру мережі. Достатньо

адаптувати алгоритми міграції агентів та параметри їхньої взаємодії з вузлами, що значно спрощує процес модернізації системи.

Результати дослідження свідчать, що поєднання безпроводових сенсорних мереж із технологією мобільних агентів є перспективним напрямом для побудови сучасних систем моніторингу. Такий підхід дозволяє ефективно працювати в умовах обмежених енергетичних ресурсів, нестабільного зв’язку та постійних змін середовища, що є характерним для більшості реальних застосувань.

Отже, отримані в роботі результати підтверджують доцільність подальших досліджень у напрямі розвитку алгоритмів міграції мобільних агентів, оптимізації їхньої взаємодії з сенсорними вузлами та впровадження інтелектуальних методів аналізу даних. Це відкриває можливості для створення більш надійних, адаптивних і енергоефективних систем збору інформації у динамічних середовищах.

Важливим аспектом оцінки надійності системи є аналіз її поведінки в умовах пікових навантажень. Імітаційні експерименти продемонстрували, що за збільшення інтенсивності вимірювань або кількості подій мобільні агенти дозволяють уникнути перевантаження радіоканалу, оскільки значна частина обробки виконується локально. У традиційних схемах збору даних за таких умов спостерігається зростання втрат пакетів і збільшення затримок, тоді як агентно-орієнтований підхід зберігає стабільні показники роботи [16].

Окремо було розглянуто вплив мобільних агентів на рівень живучості сенсорної мережі. За рахунок рівномірного розподілу навантаження та зменшення ролі окремих вузлів як постійних ретрансляторів знижується ймовірність утворення критичних точок відмови. Це дозволяє системі функціонувати протягом тривалішого часу без втрати зв’язності та деградації якості збору даних.

З точки зору практичного впровадження результати оцінки ефективності та надійності свідчать про те, що системи збору даних з мобільними агентами є особливо доцільними для застосувань, де неможливо гарантувати стабільні умови роботи мережі. До таких застосувань належать екологічний моніторинг, спостереження за

інфраструктурними об’єктами, військові та аварійно-рятувальні системи, де важливими є автономність, адаптивність і висока надійність.

Таким чином, розширена оцінка ефективності та надійності підтверджує, що запропонований підхід до організації збору даних із використанням мобільних агентів забезпечує комплексні переваги порівняно з традиційними методами. Поєднання адаптивної маршрутизації, локальної обробки інформації та автономної міграції агентів формує стійку основу для побудови сучасних безпроводових сенсорних мереж, здатних ефективно функціонувати у динамічних і ресурсно обмежених середовищах [3].

ВИСНОВКИ

У процесі виконання магістерської роботи було здійснено ґрунтовне дослідження проблематики збору та обробки даних у безпроводових сенсорних мережах, що функціонують у динамічних середовищах. Основний акцент було зроблено на застосуванні мобільних агентів як ефективного інструменту підвищення адаптивності, енергоефективності та надійності сенсорних мереж за умов змінної топології, нестабільних каналів зв’язку та обмежених ресурсів сенсорних вузлів.

У роботі проаналізовано сучасний стан розвитку безпроводових сенсорних мереж та визначено ключові фактори, що ускладнюють традиційні підходи до збору даних у динамічних умовах. Показано, що централізовані та статичні методи маршрутизації не забезпечують необхідного рівня стійкості та призводять до нерівномірного використання енергетичних ресурсів вузлів. Це обґрунтовує необхідність застосування розподілених та інтелектуальних підходів, зокрема технології мобільних агентів.

У межах дослідження розкрито сутність мобільного агента як автономної програмної сутності, здатної мігрувати між сенсорними вузлами та виконувати локальну обробку інформації. Доведено, що перенесення обчислювальних операцій безпосередньо до джерел даних дозволяє суттєво зменшити обсяг мережевого трафіку та скоротити кількість енергозатратних радіопередач.

Значну увагу в роботі приділено аналізу архітектурних рішень та моделей взаємодії сенсорних вузлів із мобільними агентами. Розглянуто клієнт-агентні, подієво-орієнтовані, кооперативні та адаптивні моделі взаємодії, а також визначено умови їх доцільного застосування.

Встановлено, що адаптивні та кооперативні моделі забезпечують найкращі результати у динамічних середовищах завдяки здатності системи до самоорганізації, розподілу навантаження та відновлення після відмов окремих елементів мережі.

У роботі детально досліджено алгоритми міграції та маршрутизації мобільних агентів. Проаналізовано детерміновані, стохастичні, оптимізаційні та багатоагентні підходи до планування маршрутів збору даних. Показано, що адаптивні алгоритми, які враховують поточний стан мережі, залишкову енергію вузлів та якість радіоканалу, дозволяють підвищити надійність доставки інформації та зменшити ймовірність втрати даних у процесі міграції агентів.

Окрему увагу приділено алгоритмам узгодження та калібрування даних у сенсорних мережах. Установлено, що використання мобільних агентів для локальної перевірки, фільтрації та корекції вимірювань дозволяє зменшити вплив шумів, дрейфу параметрів сенсорів і випадкових похибок. Поєднання статистичних методів із агентно-орієнтованою обробкою формує інтелектуальний рівень сенсорної мережі, здатний забезпечувати високу якість та достовірність зібраної інформації.

У практичній частині роботи було проведено імітаційне моделювання процесів збору даних у динамічному середовищі. Отримані результати свідчать, що застосування мобільних агентів дозволяє суттєво зменшити обсяг передаваного трафіку, забезпечити більш рівномірне використання енергетичних ресурсів та підвищити стійкість мережі до змін топології й відмов окремих вузлів. Також встановлено, що оптимальний вибір кількості агентів і стратегій їх міграції є критичним для досягнення балансу між швидкістю збору даних та енергоефективністю системи.

Особливо перспективним є застосування безпроводових сенсорних мереж з мобільними агентами для збору даних у динамічних середовищах, де умови функціонування мережі постійно змінюються.

Отримані результати мають важливе практичне значення і можуть бути використані для розробки нових підходів та вдосконалення існуючих систем збору даних у динамічних середовищах безпроводових сенсорних мереж із застосуванням мобільних агентів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Abdelkader Outtagarts. Mobile Agent-based Applications: a Survey. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. November 2009. V.9. No.11. PP. 331-339.
2. Arya K.V., Bhadoria R.S., Chaudhari N.S. (Eds.) Emerging Wireless Communication and Network Technologies: Principle, Paradigm and Performance. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. 359 p.
3. Bandyopadhyay S., Coyle E. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. Proceedings of IEEE INFOCOM. April 2003. PP. 1713-1723.
4. Balzano L., Nowak R. Blind calibration of networks of sensors: Theory and algorithms. Networked Sensing Information and Control. 2008. Springer US. PP. 9-37.
5. Bensky A. Short-range Wireless Communication, 3rd ed. Newnes, 2019. 462 p.
6. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and Practices. Release / O. Bonaventure. – cnp3book. 2018. – 272 p.
7. Bychkovskiy V., Megerian S., Estrin D., Potkonjak M. A Collaborative Approach to In-place Sensor Calibration. Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks. 2003. PP. 301-316.
8. Feng J., Megerian S., Potkonjak M. Model-Based Calibration for Sensor Networks. Sensors. 2003. PP. 737–742.
9. Min Chen, Taekyoung Kwon, Yong Yuan, Yanghee Choi, Victor C.M. Leung Mobile Agent-Based Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2007. Article ID 36871. 13 p. doi:10.1155/2007/36871.
10. Nowak R., Mitra U Boundary estimation in sensor networks: Theory and methods. In IPSN. 2003. PP. 80-95.

11. Qi H., Xu Y., Wang X. Mobile-Agent-Based Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks. Proceedings of the IEEE. 2003. V.91. No.8. PP. 1172-1183.
12. Rajasegarar S., Leckie C., Palaniswami M., Bezdek J. Quarter Sphere Based Distributed Anomaly Detection in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the IEEE International Conference Communications, UK. 2007. PP. 126-133.
13. Sallans B., Bruckner D., Russ G. Statistical Model-Based Sensor Diagnostic for Automation Systems. Field Bus Systems and their Applications. Elsevier. 2005. PP. 239-246.
14. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey. 2016. 538 p.
15. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. Computer Networks ; 5th Ed. Cloth : Prentice Hall. 2011. 960 p.
16. Taylor C., Rahimi A., Bachrach J., Shrobe H.,. Grue A. Simultaneous Localization, Calibration and Tracking in an Ad Hoc Sensor Network. Proceedings of 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN06). 2006. PP. 27-33.
17. Горяєва С.М. Методи підвищення ефективності телекомунікайних сенсорних мереж. Дисертація на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук за фахом 05.12.02 - телекомунікаційні системи і мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2008. http://www.disslib.org/metody-pidvyshchennja-efektyvnosti-telekomunikajnykh-sensornykh-merezh.html.
18. Мельнікова Л. І., Линник Є. В., Кривошапка М. В., Барсук В. А. Оптимізація маршруту мобільного стоку в беспровідній сенсорній мережі. Проблеми телекомунікацій, 2019. №1(24). С. 104-112. Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/191_melnykova_optim.pdf.

19. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
20. Толюпа С. В., Пархуць Л. Т., Власов О. М. Побудова та моделювання сенсорних мереж на сучасних інформаційних технологіях та забезпечення їх інформаційної безпеки. УДК 623.396.21 Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2011. №4(20). С.9-14.
21. Торошанко О. С. Метод вимірювань у безпроводових сенсорних мережах датчиками з повільним дрейфом параметрів. Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2018. – №1. С. 142-151.
22. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks. 2002. V.38. No.4. PP. 393–422.
23. Heinzelman W.R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2002. V.1. No.4. PP. 660–670.
24. Luo J., Hubaux J.-P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. Proceedings of IEEE INFOCOM. 2005. PP. 1735–1746.
25. Younis O., Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2004. V.3. No.4. PP. 366–379.
26. Al-Karaki J.N., Kamal A.E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. IEEE Wireless Communications. 2004. V.11. No.6. PP. 6–28.
27. Shen C.-C., Srisathapornphat C., Jaikaeo C. Sensor information networking architecture and applications. IEEE Personal Communications. 2001. V.8. No.4. PP. 52–59.
28. Максимов В. В., Фанделюк О. В. Алгоритм ієрархічної побудови мереж Ad Hoc із застосуванням правил функціонування системи Skype. Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, №1(17), 2011. С.56-63

29. Di Caro G. A., Dorigo M. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. Journal of Artificial Intelligence Research. 1998. Vol. 9. PP. 317–365.
30. Liu X., Mohapatra P. On the Deployment of Mobile Data Collectors in Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2010. Vol. 9. No. 12. PP. 1742–1756.
31. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks. 2002. Vol. 38, No. 4. PP. 393–422.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (презентація)

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації і радіотехніка
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі

Виконав: Торошанко І.І, ТСДМ-61
Науковий керівник роботи:
Варфоломеєва О.Г.

Актуальність теми: Використання мобільних агентів у динамічних сенсорних мережах є актуальним у зв'язку зі змінною топологією, обмеженими ресурсами та потребою в енергоефективному зборі даних.

Наукова новизна: Запропоновано адаптивний підхід до збору даних із використанням мобільних агентів, що зменшує мережевий трафік, підвищує узгодженість вимірювань та оптимізує енергоспоживання.

Об`єкт дослідження: процеси збору даних у динамічних сенсорних мережах.

Предмет дослідження: сенсорні мережі з мобільними агентами та алгоритми збору й обробки даних.

Мета дослідження: дослідження та розробка методів автоматизованого збору й обробки даних у динамічних сенсорних мережах із застосуванням мобільних агентів.

Завдання дослідження:

1. аналіз сучасних безпроводових сенсорних мереж та особливостей їх функціонування у динамічних умовах;
2. дослідження підходів і засобів збору та зберігання даних у сенсорних мережах зі змінною топологією;
3. вибір ефективних методів організації збору інформації із застосуванням мобільних агентів;
4. дослідження алгоритмів роботи мобільних агентів для збору та попередньої обробки даних у динамічному середовищі;
5. оцінку ефективності запропонованого алгоритму збору даних.

2

Аналіз сучасних безпроводових сенсорних мереж у динамічних умовах

Безпроводові сенсорні мережі (WSN) складаються з автономних сенсорних вузлів, які здійснюють збір, обробку та передачу вимірювальних даних.

У динамічних умовах середовища мережа зазнає постійних змін топології через мобільність вузлів, завади радіоканалу та відмови обладнання.

Основними проблемами функціонування WSN є обмежений енергетичний ресурс, нестабільність зв'язку та перевантаження окремих вузлів.

Традиційні централізовані підходи до збору даних у таких умовах є малоефективними та призводять до швидкого виснаження ресурсів мережі.

Це зумовлює необхідність застосування адаптивних і розподілених методів збору даних, зокрема з використанням мобільних агентів.

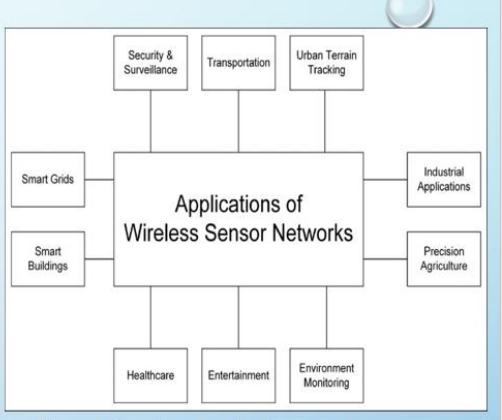


Рис. 1.1 – Основні сфери застосування безпроводових сенсорних мереж

Дослідження підходів і засобів збору та зберігання даних у сенсорних мережах зі змінною топологією

У динамічних безпроводових сенсорних мережах збір даних ускладнюється постійною зміною топології, нестабільністю радіоканалів та обмеженими енергетичними ресурсами вузлів.

Традиційні підходи з централізованою передачею даних призводять до перевантаження мережі та швидкого виснаження енергії сенсорів.

У роботі проаналізовано децентралізовані та адаптивні методи збору інформації, що передбачають локальну обробку, агрегацію та зменшення обсягу переданих даних.

Особлива увага приділена підходам, які забезпечують збереження працездатності мережі при зміні структури та відмовах окремих вузлів.

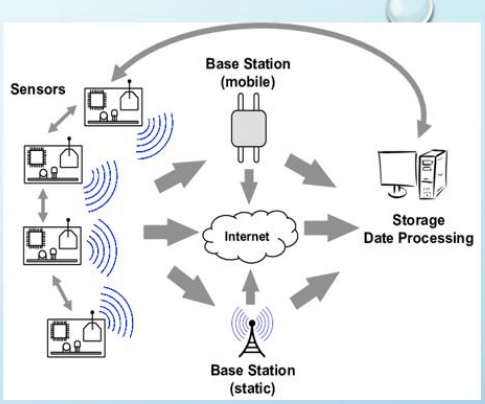


Рис. 3.1 – Модель збору даних у безпроводової сенсорної мережі

Вибір ефективних методів організації збору інформації із застосуванням мобільних агентів

У динамічних сенсорних мережах традицій підтверджено, що пакетна передача даних до центрального вузла є енергетично неефективною.

У роботі обгрунтовано доцільність використання мобільних агентів, які переносять обчислення безпосередньо до місця виникнення даних.

Мобільні агенти забезпечують локальну обробку, агрегацію та фільтрацію вимірювань, що дозволяє суттєво зменшити мережевий трафік.

Такий підхід підвищує енергоефективність, зменшує навантаження на радіоканал і забезпечує адаптацію мережі до змін топології.

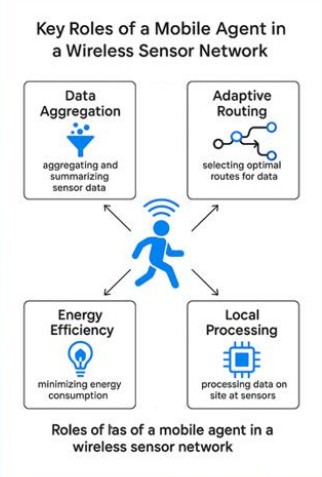


Рис. 2.2 – Ключові ролі мобільного агента

Адаптивні методи маршрутизації та передачі даних

Метод маршрутизації	Основний принцип	Переваги	Обмеження
Енергоорієнтований	Вибір маршрутів з мінімальними витратами енергії	Подовження часу життя мережі	Можливе збільшення затримок
Контекстно-орієнтований	Урахування типу та пріоритету даних	Гнучке управління трафіком	Підвищена складність реалізації
Локально-адаптивний	Використання інформації про сусідні вузли	Швидка реакція на зміни	Обмежена глобальна оптимальність
Агентно-орієнтований	Міграція мобільних агентів замість пакетної передачі	Зменшення трафіку, енергоефективність	Залежність від стратегії агента
Ієрархічний	Передача даних через кластери	Масштабованість, зменшення навантаження	Необхідність вибору головних вузлів

Дослідження алгоритмів роботи мобільних агентів у динамічному середовищі

У роботі досліджено алгоритми міграції мобільних агентів у сенсорній мережі зі змінною топологією.

Мобільний агент автономно формує маршрут обходу вузлів з урахуванням стану мережі, рівня енергоспоживання та доступності сенсорів.

Під час міграції агент виконує локальну обробку, фільтрацію та агрегацію даних безпосередньо на сенсорних вузлах.

Під час міграції агент виконує локальну обробку, фільтрацію та агрегацію даних безпосередньо на сенсорних вузлах.

Запропонований підхід дозволяє зменшити кількість міжвузлових передач і забезпечити стабільну роботу мережі в динамічних умовах.

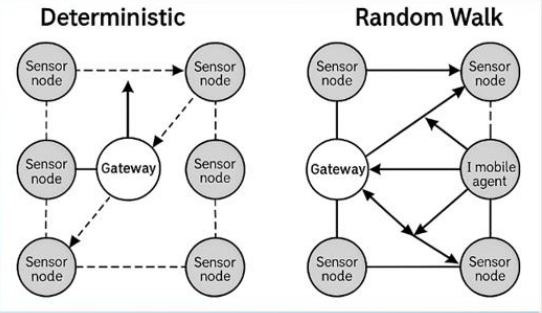


Рис. 2.3 – Міграція мобільного агента

Оцінка ефективності запропонованого алгоритму збору даних

Проведено оцінку ефективності алгоритму збору даних із використанням мобільних агентів у динамічних сенсорних мережах.

Аналіз виконано за такими показниками: обсяг мережевого трафіку, затримка доставки даних, енергоспоживання сенсорних вузлів та стійкість мережі до відмов.

Результати імітаційного моделювання показали зменшення кількості переданих пакетів у мережі за рахунок локальної обробки та агрегації даних мобільними агентами.

Запропонований алгоритм забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження між вузлами, що подовжує життєвий цикл сенсорної мережі.

Отримані результати підтверджують доцільність використання мобільних агентів для збору даних у динамічних умовах.

Проблеми та виклики динамічних сенсорних мереж

Динамічні безпроводові сенсорні мережі характеризуються постійною зміною топології, що ускладнює процес стабільної передачі даних.Переміщення вузлів, їх часткові відмови або зниження енергетичного ресурсу призводять до руйнування маршрутів і втрати зв'язності мережі.

Радіоканал у таких мережах є нестабільним і чутливим до завад, що негативно впливає на якість та надійність передавання інформації.

Обмежені енергетичні ресурси сенсорних вузлів унеможливлюють використання складних централізованих алгоритмів збору даних.

Традиційні методи маршрутизації та збору інформації не забезпечують достатнього рівня адаптивності та енергоефективності в умовах змінного середовища.

Перспективи розвитку та подальші дослідження

Напрями подальшого розвитку запропонованого підходу:

- Розширення алгоритмів роботи мобільних агентів із використанням інтелектуальних методів прийняття рішень та адаптивних стратегій міграції.
- Інтеграція мобільних агентів з методами машинного навчання для прогнозування стану мережі та оптимізації маршрутів збору даних.
- Дослідження взаємодії декількох мобільних агентів у великих сенсорних мережах з метою підвищення масштабованості системи.
- Урахування інформаційної безпеки під час міграції агентів і захисту даних у відкритих безпроводових середовищах.
- Адаптація запропонованих рішень для реальних прикладних систем з урахуванням апаратних обмежень сенсорних вузлів.

Практична перспектива

Запропонований підхід може слугувати основою для створення інтелектуальних систем моніторингу з підвищеними вимогами до автономності та надійності. Результати роботи доцільно використовувати при розробці сучасних телекомунікаційних платформ для динамічних середовищ.

ВИСНОВКИ



- Проаналізовано особливості функціонування безпроводових сенсорних мереж у динамічних умовах, де ключовими проблемами є зміна топології, обмежені енергетичні ресурси та нестабільність каналів зв'язку.
- Досліджено існуючі підходи до збору та зберігання даних у сенсорних мережах зі змінною топологією та встановлено обмеження традиційних централізованих схем.
- Обґрунтовано ефективність використання мобільних агентів для організації збору інформації, що дозволяє зменшити мережевий трафік та оптимізувати енергоспоживання.
- Проаналізовано алгоритми роботи мобільних агентів, які забезпечують адаптивний збір і попередню обробку даних у динамічному середовищі.
- Проведена оцінка показала, що запропонований підхід підвищує надійність збору даних і ефективність роботи сенсорної мережі.

АПРОБАЦІЯ

1. Boiko Liudmyla, Varfolomeeva Oksana, Kis Oleksandr, Toroshanko Ihor. Design Wireless Sensor Networks Using Mobile Agents. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2024. – №1. – С. 216-221.

2. Toroshanko Ihor, Toroshanko Andrii. Methods for Recognizing Traffic Signatures and Protocols. VI Міжнародна наукова конференція «Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії», 4 квітня 2025 року, ХНУ. – С. 144-147.

3. Варфоломеєва О.Г., Домрачева К.О., Торошанко І.І. Використання мобільних агентів для збору даних у динамічних середовищах сенсорних мереж. Наукоємні технології. – 2026. – №1 (прийнято до друку).

Дякую за увагу!

