

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

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікацій

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Явіся В.С.

« ____ » _____ 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

**на тему: «Розвиток методів інтелектуального управління безпроводовими
сенсорними мережами з мобільними сенсорами»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ТЗ-61м

Шпанчук Олег Олександрович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК, д.т.н.,

Лисенко О.І. _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТМ, к.т.н.,

Скулиш М.А. _____

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

Студент _____

Київ – 2018 року

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 2017 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Шпанчуку Олега Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Розвиток методів інтелектуального управління безпроводовими сенсорними мережами з мобільними сенсорами», науковий керівник дисертації Лисенко Олександр Іванович, д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «06» квітня 2018 р. № 1105-с
2. Строк подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження Безпроводові сенсорні мережі з мобільними сенсорами
4. Предмет дослідження Методи інтелектуального управління безпроводовими сенсорними мережами з мобільними сенсорами
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 1. Розглянути інтелектуальні мобільні сенсорні мережі, як складову телкомунікаційних мереж.
 2. Визначити час автономної роботи сенсорної мережі.
 3. Провести аналіз існуючих інтелектуальних методів управління БСММС.
 4. Розвиток інтелектуальних методів управління БСММС.
 5. Провести моделювання отриманих методів управління БСММС.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Тема, актуальність, мета, задачі.
2. Поняття про інтелектуальні безпроводові сенсорні мережі.
3. Час автономної роботи БСММС.
4. Розвиток інтелектуальних методів управління БСММС
5. Загальні висновки по роботі.

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Шпанчук О.О., Лисенко О.І., «Підхід до аналізу споживання енергоресурсів вузлом бездротової сенсорної мережі, конференція», «Проблеми телекомунікацій-18», 380-383 с.
2. Шпанчук О.О., Прищепя Т.О., «Розвиток методів інтелектуального управління безпроводовими сенсорними мережами з мобільними сенсорами», «Проблеми телекомунікацій-17», 377-380 с.

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження та вивчення отриманого завдання	10.09.16 - 01.10.16	виконано
2	Аналіз мобільних сенсорних мереж	01.10.16 - 15.11.16	виконано
3	Розгляд інтелектуальної сенсорної мережі в контексті телекомунікаційних мереж	15.11.16 - 01.12.16	виконано
4	Вивчення енергоспоживання вузлів БСММС	01.12.16 - 01.02.17	виконано
5	Аналіз існуючих інтелектуальних методів управління БСММС	10.09.16 - 01.01.17	виконано
6	Розвиток інтелектуальних методів управління БСММС	01.01.17 - 01.09.17	виконано
7	Аналіз отриманих за допомогою програмного моделювання даних	01.09.17 - 05.11.17	виконано
8	Підготовка публікацій	05.11.17 - 01.03.18	виконано
9	Підготовка пояснювальної записки	01.03.18 - 10.05.18	виконано

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Робота містить 89 сторінок, 27 рисунків, 4 таблиці. Було використано 52 джерел.

Мета роботи: Оптимізація відправки пакетів і управління потоком даних та зменшення енергоспоживання для сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах з мобільними сенсорами (БСММС).

В ході виконання даної роботи розглянуті інтелектуальні методи управління в БСММС. Проведено огляд мобільних сенсорних мереж. Розроблено енергоефективний інтелектуальний метод управління в БСММС, який споживає менше енергії, ніж існуючі методи. Удосконалено мурашиний алгоритм для оптимізації відправки пакетів і управління потоком даних в БСММС.

Ключові слова: мобільна сенсорна мережа, інформаційні потоки, мурашиний метод, методи інтелектуального управління, гіперграф, модель сенсорної мережі, автономна робота сенсорної мережі, принцип семафорів, LEACH.

ABSTRACT

The work contains 89 pages, 27 figures, 4 tables and 52 sources have been used.

Goal: Optimized packet forwarding and data flow management and power consumption reduction for sensor nodes in wireless sensor networks with mobile sensors (WSNMS).

In the course of this work, the intellectual methods of management in the BCMSM are considered. A review of mobile sensor networks. An energy-efficient, intelligent control method in the WSNMS, which consumes less energy than existing methods, is developed. An ant algorithm is optimized for optimizing packet sending and data flow management in the WSNMS.

Keywords: mobile sensor network, information flows, ant method, intelligent control methods, hypergraph, sensor network model, autonomous work of the sensor network, semaphore principle, LEACH.

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему: **«Розвиток методів інтелектуального управління
безпроводовими сенсорними мережами з мобільними сенсорами»**

Зміст

Зміст.....	1
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
Вступ.....	10
1. Поняття про інтелектуальні безпроводні сенсорні мережі.....	12
1.1 Огляд існуючих сенсорних телекомунікаційних систем.....	12
1.1.1 Класифікація інтелектуальних сенсорних систем.....	15
1.2 Огляд структури інтелектуальних бездротових сенсорних мереж ..	18
1.3. Основні стандарти в БСМ.	22
1.4. Моделі збору даних інтелектуальних БСМ.....	26
1.5. Мобільність інтелектуальних БСМ.....	26
Висновки до розділу:	28
2. Час життя і споживана потужність вузлів БСМ	29
2.1. Час автономної роботи сенсорної мережі.	29
2.1.1. Час життя кінцевого пристрою БСМ.....	31
2.1.2. Час життя маршрутизатора інтелектуальної БСМ.....	33
2.2. Способи і методи підвищення автономної роботи інтелектуальної БСМ.	35
Висновки до розділу:	38
3. Методи управління інтелектуальними БСМ з мобільними сенсорами	39
3.1. Принципи формування БСМ.....	39
3.2. Визначення інтенсивності інформаційних потоків	40
3.3. Методи управління інформаційними потоками у інтелектуальній БСМ.	42
3.4. Методика управління топологією інтелектуальних безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами	49

3.5. Методика управління топологією мережі на рівні аероплатформ чи безпілотних літальних апаратів	63
Висновки до розділу	69
4. Моделювання інтелектуальної БСМ.....	71
4.1 Результати експерименту	73
4.2 Моделювання мурашиного алгоритму	77
Висновки до розділу	81
Загальні висновки.....	82
Перелік посилань.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БСМ – безпроводна сенсорна мережа

БСММС - безпроводна сенсорна мережа з мобільними сенсорами

ЕОМ – електронно обчислювальна машина

ДЖ – джерело живлення

ЗД – збір даних

ІСУ – інтелектуальна система управління

СВ – сенсорний вузол

СТС – сенсорна телекомунікаційна система

СУ – система управління

ТС – телекомунікаційна система

Вступ

Новітні мережеві технології і прогрес в області створення мікросхем визначають важливу роль розподілених комунікаційних систем. Існує цілий ряд стандартів для забезпечення ефективною передачею даних в мережах, які реалізуються в різних протоколах. Крім стандартних способів передачі даних, все більшої популярності набувають бездротові технології. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) - новий клас мереж, що складається з мініатюрних обчислювано комунікаційних пристроїв, розподілених деяким чином на досліджуваній території і виконують розподілений збір, аналіз і передачу інформації.

БСМ отримали великий розвиток останнім часом. Такі мережі, що складаються з безлічі мініатюрних вузлів, оснащених малопотужним прийомопередавачем, мікропроцесором і сенсором, можуть зв'язати воєдино глобальні комп'ютерні мережі і фізичний світ. Концепція бездротових сенсорних мереж привертає увагу багатьох вчених, дослідницьких інститутів і комерційних організацій, що забезпечує великий потік наукових робіт з даної тематики. Великий інтерес до вивчення таких систем обумовлений широкими можливостями застосування сенсорних мереж. БСМ, зокрема, можуть використовуватися для передбачення відмови обладнання в аерокосмічних системах і в системах автоматизації будівель. Через свою здатність до самоорганізації, автономності та високою відмовостійкістю такі мережі активно застосовуються в системах безпеки і військових додатках. БСМ успішно застосовують в медицині для моніторингу здоров'я за допомогою біологічних сенсорів сумісних з інтегральними схемами сенсорних вузлів. Але найбільшого поширення БСМ отримали в області моніторингу навколишнього середовища і живих істот.

БСМ з мобільними сенсорами використовуються в таких місцях, де неможливо, важко або дорого експлуатувати провідні датчики. БСМ складаються з невеликих незалежних пристроїв, володіють здатністю вимірювання будь-яких показників (температури, звуку, вібрації, тиску, руху,

забруднення). Такі прилади називаються сенсорними вузлами, кожен з них, крім власне одного або більше сенсорів (датчиків), обладнується мікроконтролером, радіоприйомо-передатчиком або іншим засобом бездротового зв'язку, а також автономним джерелом живлення. Енергія - це самий дефіцитний ресурс, визначає тривалість роботи мережі. Через те що бездротові мережі можуть розгортатися у віддалених і важкодоступних середовищах, алгоритмічне забезпечення та реалізація програмного забезпечення та протоколів мають першорядне значення, вони повинні забезпечувати максимальний час функціонування вузлів, надійність і відмовостійкість, автоматичне конфігурування.

Ключовою особливістю сенсорних мереж є здатність до ретрансляції даних від одного вузла до іншого, що дозволяє передавати інформацію на значну відстань при малій потужності передавачів. Сенсорні вузли мають обмежену обчислювальну потужність. Канали передачі даних, що використовуються в БСМ, накладають жорсткі обмеження по пропускній здатності, а також дальності і стабільності зв'язку.

Складністю при визначенні моделі бездротової мережі є перш за все те, що така модель повинна бути водночас достатньо спрощеною і достатньо повноцінною. Простота дозволить проводити моделювання і виведення теоретичних результатів, а повноцінність повинна забезпечуватись для того, щоб така модель могла бути застосована на практиці.

Метою даної роботи є оптимізація відправки пакетів і управління потоком даних та зменшення енергоспоживання для сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах з мобільними сенсорами (БСММС).

Об'єктом дослідження є безпроводна сенсорна мережа з мобільними сенсорами (БСММС).

Предметом дослідження є методи інтелектуального управління БСММС.

1. Поняття про інтелектуальні безпроводні сенсорні мережі

1.1 Огляд існуючих сенсорних телекомунікаційних систем

Основним призначенням сучасних ТКС є забезпечення різних інформаційних систем: Internet, банківських, сенсорних тощо. Головний напрямок розвитку сучасних телекомунікаційних систем у світі засновано на створенні мереж наступного покоління (NGN, Next Generation Network), які розглядаються як конвергентні, гібридні широкосмугові мережі, які інтегрують різноманітні мережні архітектури і платформи [10-11]. Користувач мережі повинен обслуговуватися найбільш відповідним на даний момент підключенням, який задовольняє вимогам до якості обслуговування для використовуваного застосування [8-9]. Такі особливості NGN засновані на підтримці декількох мереж доступу. Отже, мережі NGN повинні бути досить гнучкими і забезпечувати всі послуги, які надаються на даний час у фіксованих мережах з різноманітними технологіями без будь-яких обмежень, використовуючи оптимальний метод підключення. Актуальною стає проблема не тільки охоплення мережі, забезпечення якості зв'язку, але й розширення переліку додаткових послуг, що надаються.

Серед сучасних технологій на рівні транспорту і особливо доступу безпроводні технології передачі інформації є найбільш швидко прогресуючими на телекомунікаційному ринку [8]. Особливе місце серед телекомунікаційних мереж різного призначення займають сенсорні мережі, які спрямовані на забезпечення моніторингу як зосереджених, так і розподілених об'єктів. Сенсорні мережі являють собою специфічну структуру, що забезпечує вирішення задач моніторингу, збирання, зберігання та обробки інформації. У сенсорних мережах використовуються як проводові, так і безпроводові технології.

Сучасна телекомунікаційна сенсорна мережа (WSN) – безпроводова сенсорна мережа, яка складається з просторово розподілених автономних

пристроїв з використанням датчиків, які забезпечують загальний контроль фізичних, екологічних чи інших параметрів: температури, звуку, вібрації, тиску, руху, дії забруднення та ін. [13,14].

Сенсорні мережі знайшли широке застосування в промисловості, сільському господарстві, правоохоронних, контролюючих і охоронних структурах. Передбачається стійка тенденція щодо розширення сфери їх застосування, за якістю моніторингу, стійкості, адаптованості [12,15].

Одне з актуальних застосувань сенсорних систем – це забезпечення моніторингу житлових, господарських та адміністративних приміщень. Це так звана проблема створення «Інтелектуального будинку». В такій системі встановлюються датчики для різних служб «Інтелектуального будинку»: управління світлом, кліматом, домашньою електронікою. Такий приклад мережі наведений на рис. 1.1 [10,11].

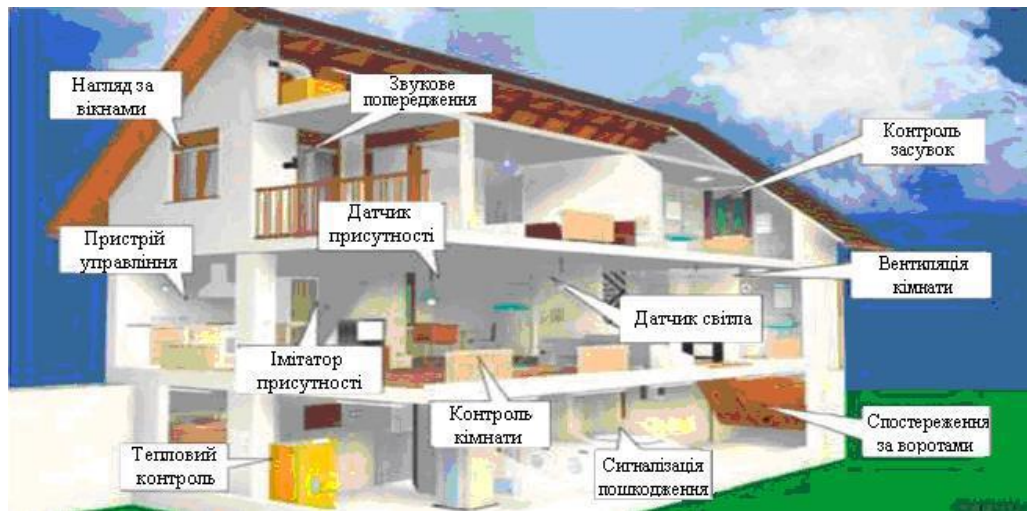


Рис. 1.1 Структурна схема «Інтелектуального будинку»

У сфері телемедицини, медицини катастроф та інших завдань охорони здоров'я сенсорні мережі застосовуються під час проведення дистанційного забезпечення медико-біологічних досліджень, моніторингу основних показників медичної телеметрії (пульс, тиск, температура), контролюванні приймання ліків і т.д., що дозволяє виконувати збір даних і зберігання інформації в деяких просторово-розподілених лабораторіях з наданням дослідникам видаленого доступу до накопичених даних.

Моніторинг місцевості включає в себе систему охорони й контролю доступу, контроль стаціонарних рубежів охорони, контроль маршрутів переміщення людей, раннє виявлення аварій, протипожежну систему. Прикладом побудови таких мереж можуть бути сенсорні мережі, призначені спеціально для охорони нафтогонів, які являють собою сукупність автономних сенсорних модулів, що монтуються над трубопроводом, що охороняється на глибині 50-80 см.

Більшість існуючих на даний час сенсорних систем: системи, які забезпечують протипожежний моніторинг, контроль цілісності приміщень і об'єктів, охоронні системи використовують, як правило, передачу інформаційних сигналів по виділених або незалежних каналах, що виділяються [12]. Загальна структура таких систем (охоронної чи пожежної сигналізації) представлена на рис. 1.2. При такій структурі на одному кінці системи встановлюється датчик, який функціонує за системою 1/0, на другому кінці – пульт сигналізації, на якому відображається наявність сигналу 0 чи 1.

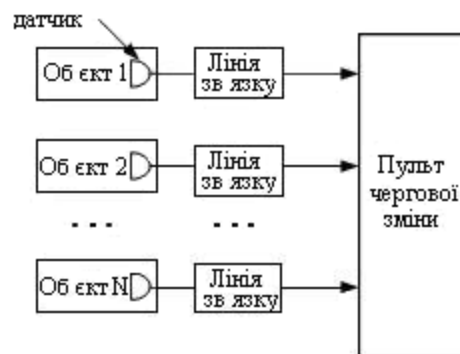


Рис. 1.2 Існуюча структура системи охоронного і пожежного оповіщення

Як видно, структура пожежної сигналізації проста і дозволяє реагувати черговій зміні на зміну параметрів на об'єктах. Лінія зв'язку виконується шляхом прокладання чи використання існуючого 2-жильного кабелю. Живлення датчика виконується автономним джерелом, яке знаходиться на об'єкті чи на пульті сигналізації, чи на тому й іншому. Перевагою такої структури є досить висока оперативність, оскільки інформація про зміну

параметрів дозволяє швидко реагувати на зміни, які з'являються. До недоліків цієї структури належать:

- обмежений обсяг інформації, що передається, часто це 0 або 1, що не дає змогу передавати іншу доречну інформацію (голос, відео, дані), яка дозволяє більш точно оцінити стан об'єкту моніторингу і прийняти обґрунтоване рішення;
- необхідність використовувати автономні виділені канали, що здорожує всю систему, а при передачі сигналів по проводах міської телефонної мережі виключає передачу мовних й інших повідомлень під час рішення сенсорних завдань;
- низька надійність ліній зв'язку і велика кількість помилкових тривог, які пов'язані зі зміною параметрів лінії, зривом, зниженням ємності і відсутністю живлення;
- низька оперативність розгортання і нарощування можливостей та ін.

Сенсорні системи і мережі, які зараз знаходяться в експлуатації, будуються, як правило, на основі виділених ліній зв'язку. На одному кінці такої лінії встановлюється датчик, що функціонує за системою 1/0, на другому – пульт сигналізації, де відображається наявність сигналу 0 або 1 (рис.1.2). За таким принципом побудовані мережі охоронної сигналізації, мережі пожежного сповіщення та ін. Така структура ліній забезпечує мінімальний обсяг інформації, що передається. Водночас, очевидна необхідність передачі й інших доречних інформаційних сигналів, таких як мова і зображення, тобто доцільним є перехід до повного набору послуг Triple Play.

1.1.1 Класифікація інтелектуальних сенсорних систем

На сьогодні актуальною є проблема побудови швидко розгортуваних мобільних, розподілених систем моніторингу, з управлінням інформаційними

потоками і забезпеченням збору даних, з наданням послуг Triple Play Service. Triple Play в телекомунікаціях — маркетинговий термін, що означає одночасне постачання двох широкосмугових послуг, доступу до високошвидкісного Інтернету і цифрового телебачення, і однієї вузькосмугової, телефону, через єдину лінію широкосмугового зв'язку. Triple Play означає бізнес-модель комбінованого постачання, але не метод вирішення технічних проблем або загальний стандарт. У такій ролі можуть виступати безпроводові сенсорні мережі, які складаються з територіально розподілених автономних пристроїв і підключених до них датчиків: температури, звуку, вібрації і т.д. Безпроводова сенсорна мережа дає можливість побудувати інформаційний простір для організації єдиної системи моніторингу й управління, об'єднуючи у собі можливості зняття показників з датчиків, уніфікації вихідного інтерфейсу вимірювальних пристроїв, слідкування за станом технічних будівель і за перебігом технологічних процесів, моніторингу місцезнаходження об'єктів, обладнання, стану здоров'я людини і ін. Сенсорні мережі класифікуються за кількома ознаками: середовище передачі даних, мобільність, організація, середовище моніторингу, параметри моніторингу й сфера застосування [14,15].

За принципом мобільності розрізняють стаціонарні й рухомі (мобільні) СТС, вибір яких залежить від сфери їх використання. Прикладом стаціонарної СТС може бути мережа «Інтелектуального будинку», в якій передача даних до центру обробки даних (ЦОД) здійснюється через виділену мережу, існуючу телекомунікаційну мережу, мережу електроживлення, разом з тим, безпроводова мережа, на думку багатьох спеціалістів, має ряд переваг. Більш того, концепція фіксовано-мобільного зв'язку (FMS), що запроваджується, вже забезпечує пріоритетність безпроводових технологій [11].



Рис. 1.3 Класифікація інтелектуальних сенсорних мереж

На підставі типу середовища, що зв'язує сенсори в єдину мережу, СТС поділяються на проводові, оптичні та безпроводові. До переваг проводових мереж можна віднести кількість та різноманітність технологій передачі даних, що надають надійну передачу із забезпеченням гарантованої якості обслуговування, висока швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с і вище та ін. У той же час, використання традиційних проводових з'єднань не завжди можливо через вимоги оперативності, мобільності, високої вартості монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, технічного обслуговування. Крім того, в деяких ситуаціях неможливе прокладання кабелів з технологічних або організаційних причин. До переваг мобільних мереж можна віднести надійність цих систем, яка забезпечує повсюдність безпроводового доступу, гнучкість і зручність створення мережі в умовах руйнувань і в найбільш критичних ситуаціях. Лінії зв'язку для СТС крім високої надійності, повинні володіти високою вибірковістю і малим часом відновлення після аварії, що особливо важливо у випадку застосування їх в критичних ситуаціях [15].

Таким чином, при побудові СТС необхідно орієнтуватися на вибір безпроводових методів доступу в телекомунікаційних сенсорних мережах.

1.2 Огляд структури інтелектуальних бездротових сенсорних мереж

Безпроводові сенсорні мережі з мобільними сенсорами (БСММС) належать до самоорганізуючих радіомереж, складаються з невеликої кількості простих автономних мобільних сенсорних вузлів, що містять сенсор, процесор, систему передачі даних, джерело енергії. Ці вузли поширюються на території для виконання завдання дослідження певного явища. На даний момент вони успішно застосовуються в промисловості, сільському господарстві, військовій сфері.

Реалізація всіх етапів управління БСМ з використанням методів інтелектуального управління вузловими та мережевими ресурсами, а також відповідних програмних та апаратних засобів, дозволить: забезпечити збір і обробку необхідних (мінімальних) обсягів службової інформації про стан БСММС; ідентифікувати стан БСММС та здійснювати його прогнозування з урахуванням високої динаміки зміни топології мережі та інших параметрів її функціонування; визначати вузлові та мережеві цільові функції управління щодо оптимізації процесу обслуговування трафіка; визначати стратегії та способи досягнення цільових функцій; координувати управлінські рішення, що приймаються інтелектуальними систем управління (СУ) вузлів (на маршруті передачі чи інформаційному напрямку) в умовах децентралізованого управління БСМ, поповнювати бази знань вузлових систем управління новими правилами з використанням методів самонавчання.

Інтелектуальна система управління (ІСУ) БСМС - множина взаємодіючих у процесі передачі інформації вузлових інтелектуальних СУ, в основі яких знаходиться математичне (програмне) забезпечення, яке здатне реалізувати функції інтелектуального управління БСМ, в умовах її параметричної та структурної невизначеності, шляхом збору і перетворення службової інформації про стан БСМС у знання про цілі та параметри функціонування мобільних вузлів для реалізації рішень щодо якісного обслуговування трафіка, а також забезпечити спроможність вузлових інтелектуальних СУ до навчання

на власному досвіді (самонавчання). Важливо зазначити, що головна архітектурна особливість [29], яка відрізняє ІСУ від побудованої за традиційною (СУ без інтелектуальних методів управління) схемою, пов'язана з підключенням технологій зберігання й обробки знань (блок «база знань») для реалізації здатності виконувати необхідні функції в умовах невизначеності (неповноти інформації) при випадковому характері зовнішніх впливів. В базі знань міститься інформація про принципи побудови системи управління та мету її функціонування, специфіку використання різних методів управління, а також особливості функціонування підсистеми реалізації рішень та самого об'єкту управління. Крім того, до складу системи управління, у разі необхідності, може входити підсистема поповнення знань та навчання, яка забезпечує узагальнення накопиченого досвіду і, таким чином, поповнює базу новими знаннями.

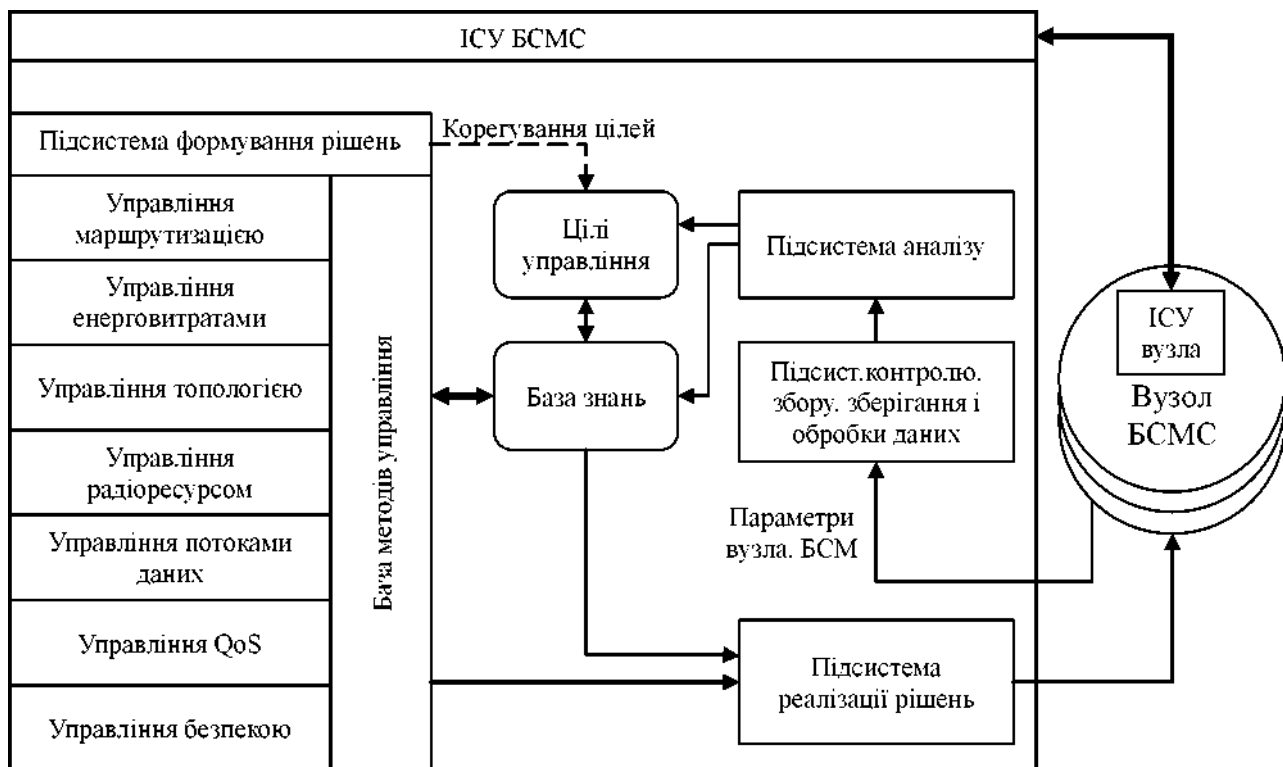


Рис. 1.4. Приклад моделі ІСУ

В даний час існує безліч прикладів використання інтелектуальних бездротових ad hoc мереж. Наприклад, інтелектуальна бездротова сенсорна мережа, розгорнута у сільськогосподарчому полі дозволяє отримувати і

аналізувати дані про вологість ґрунту . Це дозволяє оцінити майбутній урожай, а також дає можливість, у разі виникнення критичної ситуації, своєчасно вжити необхідних заходів. Бездротова мережа, розгорнута в будівлях промислової зони, допомагає швидко усунути пожежу, в разі його виникнення. Мініатюрні сенсори швидко сповістять про джерело загоряння, отримана інформація дозволить оцінити шляхи подальшого розповсюдження вогню. А бездротові сенсори, вбудовані в стіни будівлі, постраждалого від землетрусу, зберуть дані про вібрації. Це допоможе оцінити безпеку подальшої експлуатації постраждалого будинку. Вище перераховані типові схеми використання бездротових мереж, однак даними прикладами області їх використання далеко не вичерпуються. Бездротові мережі можуть використовуватися практично в будь-яких областях, де потрібно прийом або передача актуальних даних, а також їх своєчасний аналіз.

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

Типові модулі бездротового вузла:

- Пристрій для контролю за спостережуваною системою (датчик). У загальному випадку являє собою вимірювальний пристрій, здатний відстежувати ряд параметрів, наприклад температуру, вологість, рівень радіації, і т.д.
- Модуль живлення. Мобільність пристроїв накладає на цей модуль ряд вимог. Вузол не може отримувати енергію з стаціонарної електромережі. Тим не менш, він повинен бути забезпечений енергією протягом усього часу виконання поставленого завдання. Як джерело енергії може використовуватися акумулятор, сонячна батарея, пристрій, що одержує енергію з радіоефіру.

- Обчислювальний модуль. Являє собою, по суті, мініатюрний обчислювальний пристрій. Обчислювальний модуль може управлятися спеціалізованою операційною системою, наприклад, TinyOS. Мініатюризація накладає обмеження на обчислювальні здібності такого пристрою: обсяг пам'яті і частота процесора обмежені. Обчислювальний модуль, спільно зі спеціалізованим програмним забезпеченням керують поведінкою сенсора, визначають порядок збору та передачі корисної інформації і службових даних.
- Радіопередавач.

Такий поділ використовується для побудови централізованих систем моніторингу та управління, в яких координатор або сам обробляє інформацію з усієї мережі, або передає її на пристрій з великою кількістю ресурсів (наприклад, персональний комп'ютер). Розподілені системи на сенсорних мережах поки мало поширені через обмежений функціоналу кінцевих вузлів.

На сьогоднішній день в області сенсорних мереж широко застосовуються апаратні рішення з наступними характеристиками:

- RISC-процесор з частотою від 8 до 32 МГц;
- об'єм оперативної пам'яті від 8 до 192 Кбайт;
- об'єм зовнішньої флеш-пам'яті від 0,5 до 8 МБайт.

Особливо важливими є характеристики споживаної потужності в різних режимах. Типові значення наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Режими роботи бездротових модулів БСМ

Режим роботи	Позначення потужності	Типове значення, мВт
Прийом	P_{rx}	52
Передача	P_{tx}	45
Обробка	P_a	20
Режим сна	P_s	0.03

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

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

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

1.3. Основні стандарти в БСМ.

Спочатку виникнувши в якості узагальненої концепції розумного пилу (Smart Dust), сенсорні мережі поступово набували конкретних обрисів і на сьогоднішній день є досить добре стандартизованими. Розглянемо основні з існуючих стандартів.

802.15.4

Стандарт IEEE 802.15.4 [40] є сьогодні основним в області сенсорних мереж. Він описує фізичний і каналний рівні еталонної моделі OSI. Більш високі рівні доповнюються в інших стандартах, наприклад, ZigBee [41]. Стандарт передбачає роботу в трьох частотних діапазонах: один канал 868,0-868,6 МГц, 10 каналів в діапазоні 902-928 МГц і 16 каналів в діапазоні 2400-2483,5 МГц.

Мережа стандарту IEEE 802.15.4 містить два типи пристроїв - повнофункціональні (FFD - Full Function Device) і пристрої зі зменшеною функціональністю (RFD - Reduced Function Device). За принципом FFD працюють координатор і маршрутизатори мережі, по принципу RFD - кінцеві пристрої. Кожна мережа має свій ідентифікатор (PAN ID - personal area network ID).

Мережа, що складається з одного FFD і декількох RFD, утворює топологію типу «зірка» (рис. 1.5, а). Якщо в мережі кілька FFD, топологія може бути більш складною. У загальному випадку вона має вигляд тимчасової мережі P2P (peer-to-peer) або «кожен з кожним» (рис. 1.5, б). Останній вид топології також можливий у вигляді об'єднання декількох зіркоподібних кластерів. На практиці часто застосовується деревоподібна топологія.

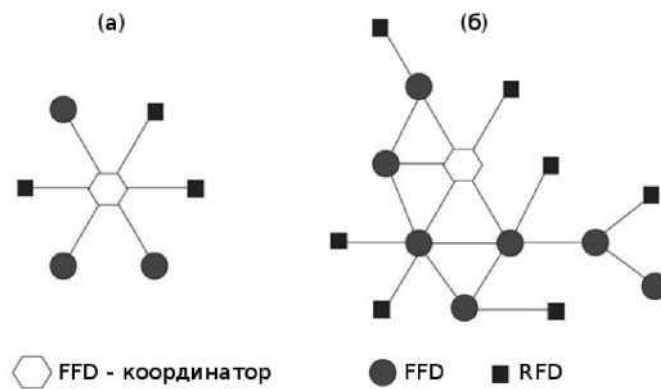


Рис. 1.5. Види топологій мереж стандарту IEEE 802.15.4

У кожного пристрою мережі є унікальний 64-розрядний MAC-адрес, який, як правило, записується в ПЗУ виробником. Для спрощення обміну всередині мережі координатор може призначати пристроям більш короткі 16-розрядні адреси. Інформаційний обмін в мережі відбувається шляхом послідовності так званих суперфреймів (superframe).

У загальному випадку суперфрейм включає керуючий інтервал (beacon), за ним йде інтервал конкурентного доступу відповідно до механізму CSMA / CA (випадковий множинний доступ з контролем несучої і запобіганням колізій) і період призначеного доступу. Останній містить набір тимчасових інтервалів,

призначених певним пристроям, чутливим до затримок, для передачі даних (гарантовані таймслоти, GTS).

Кожен пристрій передає інформацію за допомогою фреймів (пакетів). Вони можуть бути чотирьох типів - керуючі, фрейми даних, фрейми підтвердження прийому даних і фрейми команд MAC-рівня.

ZigBee/ZigBee Pro

Стандарт ZigBee [41] доповнює верхні рівні еталонної моделі OSI, використовуючи IEEE 802.15.4 в якості своєї основи. Зокрема, специфікація визначає алгоритми маршрутизації в комірчастій мережі, коли між парою вузлів може бути кілька маршрутів.

З огляду на сильну обмеженість в ресурсах сенсорних вузлів і невелику пропускну здатність каналу зв'язку, що виключають можливість регулярного обміну службовою інформацією, використовується спеціальний протокол маршрутизації AODV з обчисленням маршруту на вимогу. Відповідно до даного протоколу, перед тим, як відправити дані віддаленого вузла, відбувається виявлення найкращого шляху через розсилку спеціального запиту на передачу. Це дозволяє уникнути постійного зберігання великих за обсягом таблиць маршрутизації в пам'яті вузлів.

Іншою специфікою стандарту ZigBee є детальний опис сервісів призначених для користувачького рівня, спрямованою на забезпечення сумісності обладнання різних виробників. З цією метою під конкретні цільові додатки були розроблені профілі, наприклад Smart Energy, Home Automation, Healthcare і інші.

EnOcean

Появі стандарту EnOcean [42] сприяли два основні чинники:

1. Створення мікроконтролерів і приймачів з дуже малою споживаною потужністю, вимірюваною нановатами.

2. Створення перетворювачів альтернативної енергії малих розмірів (Micro Energy Harvesters, МЕН) . На даний момент найбільш ефективними є

конвертори на основі п'єзомеханічних генераторів, фотоелементів, термоелектричних перетворювачів Пелет'є.

Як наслідок, стало можливим створення повністю автономних пристроїв збору даних. Пристрої на базі стандарту ЕпОсеап можуть працювати на різних частотах, найбільшого поширення набули ті з них, які використовують діапазон 868 МГц.

Цифровий пакет даних стандарту ЕпОсеап є повідомлення розміром 14 байт і передане зі швидкістю 120 кбіт / с. Випадковий алгоритм доступу до середовища, що витрачає на безпосередню передачу даних менше 5 мс, характеризується низькою ймовірністю виникнення колізій. Однак незважаючи на всі переваги автономної роботи даний стандарт поки не набув широкого поширення через низку причин:

- Більш висока вартість обладнання через використання перетворювачів альтернативної енергії.
- Малі розміри мереж.
- Низька швидкість і невелика дальність передачі (типові значення - до 30 м в приміщеннях і 300 м на відкритій місцевості).

Проведений аналіз стандартів показує, що сенсорні мережі по базових алгоритмах роботи ідентичні іншим цифровим бездротовим мережам з роздільним доступом до середовища передачі. Таким чином, при моделюванні процесу передачі даних можна застосовувати розроблені раніше моделі.

У той же час БСМ розраховані на передачу невеликих обсягів даних з малою частотою - це дозволяє переводити пристрою в режим низького споживання енергії для збільшення часу їх автономної роботи. Тому актуальним завданням є дослідження і розробка моделей, описуваних мережу з точки зору потужності, споживаної пристроями.

1.4. Моделі збору даних інтелектуальних БСМ.

Виділяють 4 базових моделі збору даних в БСМ:

1. **Подієва модель** використовується в мережах, які фіксують деякі події в певній галузі, наприклад, спрацьовування тривожного датчика, вихід фізичного параметра за допустимий діапазон, близькість розряду акумулятора і ряд інших. Важливою особливістю є те, що в загальному випадку точний час настання подій ніяк не можна передбачити, тому при дослідженні мереж використовуються імовірнісні характеристики виникнення подій як випадкового процесу. Як правило, до самої мережі пред'являються деякі вимоги за максимальною затримкою передачі інформації про подію в центр збору даних.
2. При передачі **за розкладом**, так само як і в подієвій моделі, процес відправки повідомлень ініціюється елементами системи, а не центром збору даних, проте він прив'язаний до певного розкладу, що дає можливість синхронізувати роботу вузлів мережі.
3. Збір даних **за запитом** застосовується в системах, що накопичують інформацію про деяке явище, щоб потім на вимогу передати її в центр. Прикладами можуть служити система екологічного моніторинга, система моніторингу будівельних конструкцій та подібні до них. Затримки передачі даних, як правило, не критичні.
4. Часто застосовується **гібридна модель**, що поєднує в собі особливості перших трьох. Наприклад, тестові повідомлення про стан мережі можуть передаватися через фіксовані інтервали, в той же час інформація про виникаючі події передається згідно подієвої моделі.

1.5. Мобільність інтелектуальних БСМ.

Мобільність створює в бездротових мережах ряд нових завдань, які потрібно вирішувати при проектуванні систем з рухомими вузлами, причому майже на всіх рівнях моделі OSI. Ключові завдання, пов'язані з підтримкою мобільності

окремих вузлів мережі, вирішуються на мережевому рівні. Вони включені в концепцію управління мобільністю.

Управління мобільністю (Mobility Management) включає в себе набір алгоритмів і протоколів, необхідних для того, щоб мобільні пристрої могли ефективно обмінюватися даними по бездротовому каналу в ситуації, коли їх місце розташування в просторі змінюється з плином часу. Приведемо наступну класифікацію завдань управління мобільністю:

1. Контроль місцезнаходження мобільних пристроїв, що задає такі основні параметри:

- Спосіб визначення місця розташування мобільних пристроїв в просторі.
- Метод адресації мобільних пристроїв.
- Формат і розміщення баз даних з інформацією про географічне положення мобільних елементів.
- Алгоритм оновлення інформації про місцезнаходження.

2. Управління перемиканням - щоб змінити точку з'єднання мобільного елемента з мережею, що включає наступні завдання:

- Визначення умов запуску процедури перемикання (ослаблення сили сигналу, перевантаження каналу зв'язку, наявність кращого з'єднання, зміна топології мережі та ін.)
- Встановлення нового з'єднання.
- Організація маршрутизації пакетів через нову точку доступу.

Однак якщо для традиційних мереж вирішення перерахованих вище завдань направлено головним чином на забезпечення ефективного перебудування мережі (наприклад, при переході мобільного елемента від однієї базової станції до іншої) за критерієм мінімізації затримок, то в сенсорних мережах критерієм виступає мінімізація додаткової споживаної енергії.

Висновки до розділу:

Сенсорні системи в даний час інтенсивно розвиваються, удосконалюються і є важливою складовою частиною інформаційного суспільства, забезпечуючи моніторинг різних промислових, природних, соціальних та ін. процесів. Області застосування сенсорних систем охоплюють різні галузі народного господарства, медицину, правоохоронні, контрольні і охоронні структури. Проведений аналіз експлуатованих в даний час сенсорних систем і мереж показав, що сенсорні системи та мережі будуються часто на основі виділених ліній зв'язку, на одному кінці якого встановлюється датчик, що функціонує за системою 1/0, на другому кінці – пульт сигналізації, на якому відображається наявність сигналу 0 або 1. Класифікація СТС показала, що сучасні безпроводові сенсорні мережі повинні будуватися за технологіями сучасних мереж наступного покоління NGN і повинні забезпечувати передачу різних видів інформації: даних про стан того чи іншого об'єкта або групи об'єктів, що містять інформацію про різні параметри об'єкта моніторингу; мовні сигнали в цифровій формі, призначені для обміну мовною інформацією між персоналом центру обробки даних або пультів і персоналом на об'єктах моніторингу; мультимедійну інформацію з можливістю передачі як статичних, так і динамічних зображень. З аналізу структурних компонентів і топології сенсорних мереж слідує: безпроводові сенсорні мережі будуються на базі сенсорів і ліній зв'язку. Сенсор являють собою пристрій, який складається з датчика, що здійснює вимірювання параметрів об'єкта моніторингу, і прийомопередавача. Розрізняють три типи пристроїв СТС: координатор, маршрутизатор і кінцевий пристрій. Ці пристрої відрізняються функціональним призначенням, і відповідно апаратною реалізацією.

Показані переваги й недоліки основних стандартів та моделей збору даних в інтелектуальних БСМ.

2. Час життя і споживана потужність вузлів БСМ

2.1. Час автономної роботи сенсорної мережі.

Концепція сенсорних мереж передбачає, що будь-який вузол працює від автономного джерела живлення. Якщо таким джерелом є звичайний акумулятор з непоповнюваною в процесі роботи енергією, то в певний момент часу він розряджається і автономний пристрій перестає працювати.

Так як в загальному випадку всі елементи БСМ є автономними, обов'язково настає момент, коли мережа більш не може вирішувати покладені на неї завдання. Час від початку роботи мережі до даного моменту називається часом життя або часом автономної роботи мережі (*network lifetime*). Проблема полягає в тому, що в кожному окремому випадку момент виходу мережі з ладу може визначатися по-різному, в залежності від вимог до якості обслуговування.

При вирішенні практичних завдань на базі автономних БСМ виникають дві основні задачі, пов'язані в показником часу життя:

1. Оцінка передбачуваного часу життя мережі при заданих характеристиках апаратних засобів і алгоритмах її роботи.
2. Збільшення часу життя за рахунок застосування ряду методів і алгоритмів.

Дослідження поняття часу життя мережі і пов'язаних з ним завдань є одним з основних питань даної магістерської роботи.

Енергоефективність визначається тим, наскільки раціонально в деякій системі використовується надана їй ззовні енергія.

$$E = \frac{W_{\Pi}}{W_{\Pi} + W_{\text{НП}}}, \quad (2.1)$$

де W_{Π} – корисно використовувана енергія,

$W_{\text{НП}}$ – непродуктивні витрати.

В цілому зрозуміло, що вузол бездротової мережі збору даних можна вважати працюючим, поки він може безпомилково зчитувати показання з датчиків, виробляти необхідні обчислення і передавати дані в мережу. При розробці та розгортанні мережі важливо заздалегіть оцінити приблизний час роботи кожного вузла до моменту, коли буде необхідна заміна його батарей.

Для цього важливо розуміти, які фактори впливають на тривалість часу його автономної роботи.

Зокрема, добре відомо, що енергоспоживання окремих елементів мережі залежить від наступних факторів, які необхідно брати до уваги при моделюванні БСМ: характеристики апаратних засобів, частота збору і передачі даних, протоколи фізичного і канального рівня, топологія мережі, протоколи маршрутизації.

У будь-якої сенсорної мережі є три типи вузлів - кінцеві пристрої, маршрутизатори (ретранслятори) і стоки. Стоки не являють інтерес з точки зору часу автономної роботи, бо уже було відзначено, зазвичай вони підключені до джерел живлення, які мають на порядок більшу ємність.

Розглянемо більш докладно методику розрахунку часу життя кінцевих пристроїв і ретрансляторів. Вона ґрунтується на наступних припущеннях:

- Алгоритм роботи пристрою є строго детермінованим, для зовнішніх чинників, які є випадковими величинами, відомо математичне очікування.
- Відсутній ефект відновлення батареї. При необхідності він може бути врахований шляхом збільшення початкової енергії пристрою.

Тоді знаючи початкову енергію батареї E_0 і потужність P , споживану пристроєм, можна приблизно оцінити час його життя по формулою:

$$t = \frac{E_0}{P} \quad (2.2)$$

2.1.1. Час життя кінцевого пристрою БСМ.

Кінцевий пристрій призначений для зчитування показань з власних датчиків і передачі їх в мережу. Головною його відмінністю від ретранслятора є відсутність можливості наскрізної передачі через себе даних від інших пристроїв. При використанні подієвої моделі або моделі передачі за розкладом, він, як правило, працює циклічно рис. 2.1.

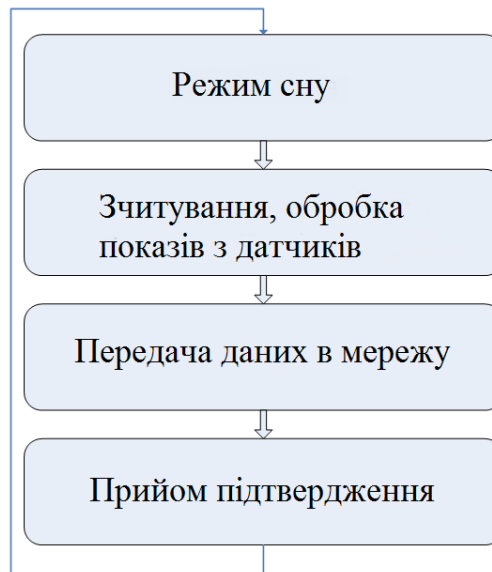


Рис. 2.1. Цикл роботи кінцевого пристрою

Беручи до уваги показники, наведені в таблиці 1.1, можна зробити висновок про те, що частота зчитування показань з датчиків є одним з ключових параметрів, що визначають час життя кінцевого пристрою, так як від неї безпосередньо залежить тривалість перебування вузла в режимі низького енергоспоживання.

Формула споживаної потужності для кінцевого пристрою має вигляд:

$$P_{ed} = \frac{P_f t_f + P_a t_a + P_s (t_c - t_f - t_a)}{t_c}, \quad (2.3)$$

де t_c - тривалість одного циклу роботи пристрою [с];

P_f - середня потужність в процесі передачі даних і подальшого прийому підтвердження [Вт];

t_f - час, що витрачається на передачу даних та обмін підтвердження [з];

P_a - споживана потужність в режимі обробки даних (зчитування показників) [Вт];

t_a - сумарний час, що витрачається на зчитування показань з датчиків, їх обробку і підготовку до передачі [с];

P_s - споживана потужність в режимі сну [Вт];

Вважається, що $t_a + t_f < t_c$, тобто у кінцевого пристрою є достатньо часу на перехід в сплячий режим.

У формулі (2.3) величини P_a і P_s є постійними і визначаються особливостями конкретної апаратної реалізації пристрою. Час t_a залежить як від характеристик використовуваного процесора, датчиків, так і від складності та програмної реалізації алгоритму обробки даних.

Час t_f , а також потужність P_f залежать від використовуваного стандарту безпроводної передачі, розміру переданих даних, а також ймовірності помилок при передачі. Розглянемо останню залежність більш докладно.

На практиці передача по бездротовому каналу завжди пов'язана з можливими втратами як при передачі кадру з корисним навантаженням, так і при відправці підтвердження. В результаті пристрій змушений ініціювати одну або кілька повторних передач, що затримують перехід в сплячий режим.

Введемо додатковий параметр p_e - ймовірність помилки при передачі. Якщо вважати, що ймовірність помилки на $(n + 1)$ -й передачі не залежить від кількості попередніх передач n , отримаємо, що ймовірність того, що передача пройде за один раз, буде дорівнює $(1 - p_e)$, за два рази - $p_e (1 - p_e)$, за n - $p_e^{n-1} (1-p_e)$. З огляду на те, що максимальна кількість передач як правило завжди програмно обмежена деяким значенням N , отримаємо формулу для середнього часу, що витрачається на передачу кадру в умовах повторних передач:

$$t_{real} = t_f \left[(1 - p_e) \sum_{i=1}^{N-1} i p_e^{i-1} + N \cdot p_e^{N-1} \right], \quad (2.4)$$

де t_f - час передачі даних з підтвердженням без урахування повторних передач;

N - максимальна кількість передач, $N = 1, 2, 3, \dots$

Параметр p_e залежить як від зовнішніх по відношенню до мережі чинників (відношення сигнал / шум та ін.), так в ряді випадків і від внутрішніх особливостей побудови мережі. Наприклад, при випадковому доступі до загального середовища передачі, ймовірність виникнення помилки буде залежати від кількості вузлів, що знаходяться в зоні покриття приймача, від інтенсивності потоків даних на кожному з них. Більш детально даний взаємозв'язок описується в статті [35].

Підставляючи P_{ed} замість P в формулу (2.2), можна оцінити час автономної роботи кінцевого пристрою.

2.1.2. Час життя маршрутизатора інтелектуальної БСМ

Відомо, що в подієво-орієнтованих сенсорних мережах, працюючих за алгоритмом асинхронного доступу до середовища передачі, маршрутизатори є вузьким місцем з точки зору часу життя мережі. Це пояснюється тим, що для своєчасної доставки інформації про виникаючі події маршрутизатор весь час повинен знаходитися в режимі з включеним прийомопередавачем.

Слід також зазначити, що енергоспоживання ретранслятора дуже сильно залежить від використовуваного протоколу маршрутизації, який визначає службовий трафік, що генерується для створення і підтримки таблиць маршрутизації.

Нехай на вхід маршрутизатора надходять n вхідних потоків даних. Інтенсивність i -го потоку позначимо через λ_i . Зауважимо, що в i -му потоці приходять кадри однакової довжини L_i . Тоді на виході будуть продубльовані вхідні потоки, а також додані кадри підтвердження, що відправляються назад для кожного, пакета.

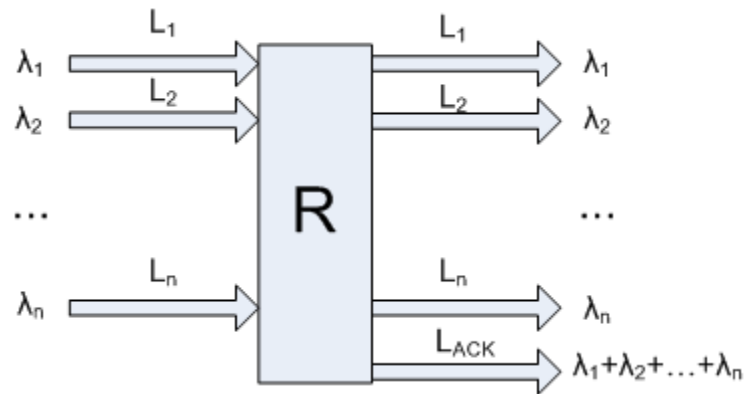


Рис. 2.2. Модель маршрутизатора інтелектуальної мережі

Час, що витрачається на прийом всіх кадрів:

$$k_{rx} = \sum_{i=1}^n \tau_i \lambda_i,$$

де

τ_i - час, що витрачається на прийом одного пакета (що не включає відправку підтвержень), залежне від його довжини L_i ;

λ_i - інтенсивність пакетів i -го потоку.

Час, що витрачається на передачу всіх кадрів разом з відправкою підтвержень:

$$k_{tx} = \sum_{i=1}^n \tau_i \lambda_i + t_{ACK} \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

де t_i - час, що витрачається на передачу одного пакета

t_{ACK} - час, необхідний для відправки підтвердження для кожного кадру.

Будемо розглядати випадок, коли $k_{rx} + k_{tx} < 1$, тобто ретранслятор встигає вчасно обробляти вхідні потоки даних. Споживана потужність маршрутизатора дорівнює:

$$P_r = P_{tx} k_{tx} + P_{rx} k_{rx} + (1 + k_{tx} - k_{rx}) P_{idle},$$

де P_{tx} - середня потужність ретранслятора в режимі передачі,

P_{rx} - середня потужність ретранслятора в режимі прийому,

P_{idle} - потужність ретранслятора в режимі очікування.

Ключовим параметром, який істотно впливає на час життя маршрутизатора, є *Pidle*. Його значення визначається алгоритмами і протоколами роботи бездротової мережі. Якщо вимоги до затримок передачі даних дозволяють переводити маршрутизатори в режим зниженого енергоспоживання, або використовується один з енергозберігаючих протоколів, то *Pidle* буде близький до споживаної потужності в режимі сну P_s (див. Табл. 1.1). В іншому випадку він буде дорівнює P_{rx} і, як наслідок, час автономної роботи ретранслятора буде на кілька порядків менше.

2.2. Способи і методи підвищення автономної роботи інтелектуальної БСМ.

До найбільш простих способів відносяться поліпшення апаратних характеристик пристроїв: зменшення енергоспоживання окремих компонентів, оптимізація їх розміщення на кристалі або друкованій платі або збільшення ємності батарей. Проте, слід зазначити, що у способу є як фізичні (передача даних по радіоканалу на задану відстань, так само як і обробка даних мікропроцесором, вимагають певних енергетичних витрат) і вартісні обмеження (використання більш енергоефективних компонентів призводить до подорожчання систем). Крім того, використання великих по ємності батарей неминуче призводить до збільшення розміру пристроїв, в той час як сама концепція сенсорних мереж передбачає їх мініатюрність.

З точки зору програмних алгоритмів обробки даних на вузлах системи можливі наступні варіанти:

- Стиснення даних. Даний метод має свої обмеження, крім того в сенсорних мережах самі дані, як правило, невеликі за обсягом, тому їх стиснення не дає великого ефекту.
- Накопичення даних і їх подальша передача великими блоками. Метод заснований на тому, що в сучасних бездротових стандартах будь-яка

передача цифрового пакету пов'язана з додатковими витратами, тому вигідніше передавати дані великими блоками в одному пакеті.

Останні дослідження в області мініатюрних перетворювачів альтернативної енергії (МЕН, Micro-Energy Harvesters) відкрили ряд можливостей для створення повністю автономних вузлів сенсорної мережі при збереженні їх невеликих розмірів. Відомий ряд готових рішень для підключення сенсорних вузлів до мініатюрних сонячних батарей, перетворювачів вібраційної енергії і термогенератор на основі елемента Пелетье [43].

Однак на сьогоднішній день жодне з рішень по збору і перетворення альтернативної енергії ще не знайшло масового застосування в реальних мережах збору даних, що складаються з сотень вузлів, перш за все, через високу вартість, що включає в себе витрати на регулярне обслуговування. Але в перспективі даний підхід може стати одним з провідних і в кінцевому рахунку вирішити проблему обмеженого часу життя БСМ.

Як було зазначено вище, сенсорні мережі головним чином призначені для збору даних. Це означає, що існує один або кілька виділених вузлів, до яких стікається інформація зі всієї мережі. Дані вузли (стоки), як правило, мають постійне джерело живлення, інтерфейси сполучення з локальними, глобальними мережами або з більш потужними обчислювальними пристроями. Таким чином, в сенсорної мережі є переважний напрямок рух корисного трафіку, що приводить до того, що через вузли маршрутизації, що знаходяться поруч зі стоками, проходить на порядок більший обсяг трафіку.

Сучасні технологічні досягнення дозволили зробити мікропроцесори з дуже малою споживаною потужністю, здатні виконувати широкий спектр завдань. Однак для того, щоб передати дані по бездротовому каналу зв'язку, необхідно затратити на порядок більший обсяг енергії (див. Табл. 1.1).

З таблиці 1.1 очевидно, що чим більше даних проходить через вузол бездротової мережі, тим більше його споживана потужність. Як наслідок, в мережі виникає проблема дисбалансу енергоспоживання (рис. 2.3), що

приводить до того що автономні елементи, розташовані поруч з центральним вузлом (вузлами) збору даних, раніше інших виходять з ладу через розрядження власних акумуляторів, і, як наслідок, зменшується час автономної роботи сенсорної мережі.

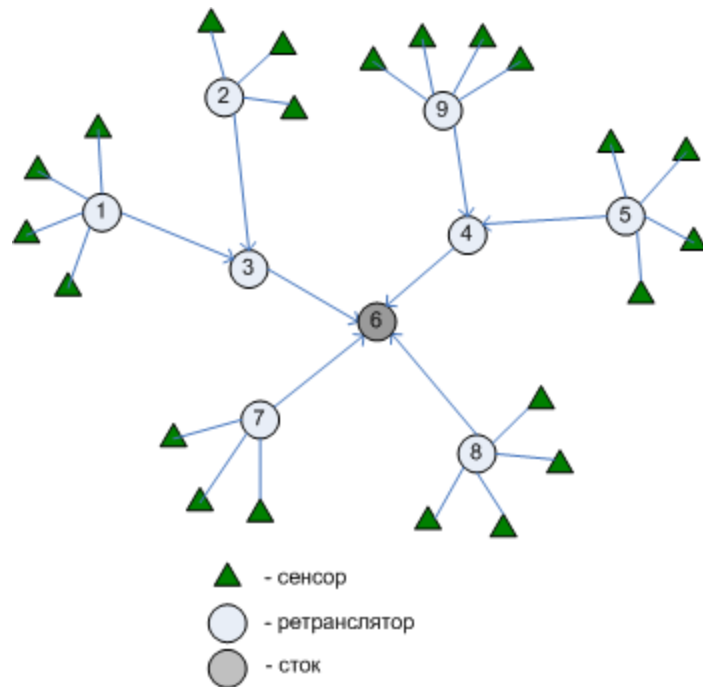


Рис. 2.3. Структура сенсорної мережі

Для вирівнювання споживаної потужності всіх вузлів мережі використовують різні методи енергетичної балансування (energy balancing). Наведемо короткий опис основних методів.

1. Індивідуальний підбір ємності батарей в залежності від положення пристроїв в структурі мережі і виконуваних ними функцій. В цьому випадку ключові ретранслюючі пристрої можуть забезпечуватися великими по ємності акумуляторами. Даний підхід є одним з самих простих, але одночасно приводить до низької масштабованості мережі і її поганий адаптації до зміни умов функціонування. Також необхідність розробки різних конструктивних рішень під різні елементи призводить до збільшення вартості кінцевих систем.
2. Різна щільність розміщення вузлів мережі в залежності від передбачуваної інтенсивності трафіку в конкретній зоні. дане

рішення направлено на забезпечення надмірності в структурі мережі і дублювання функцій окремих вузлів. Так при виході з ладу чергового маршрутизатора його функції будуть перекладені на сусідній елемент, до цього моменту ніяк що не використовується.

До програмних методів відносять використання протоколів маршрутизації, заснованих на метриці залишкової енергії вузлів [33] або віртуальних координатах [30], чергування дальньої і ближньої передачі [38], позиціонування вузлів [31], а також кластеризацію [37].

Відомо, що в протоколах маршрутизації традиційних мереж використовуються метрики, спрямовані на збільшення пропускну здатності мережі або зменшення затримок переданих даних. Подібними метриками можуть служити кількість проміжних вузлів (хопів) до адресата, пропускну здатність каналу зв'язку, рівень завантаження лінії. У сенсорних мережах часто застосовується метрика залишкової енергії вузлів на шляху до стоку. В цьому випадку з безлічі альтернативних маршрутів вибирається той, на якому вузли мають велику залишкову енергію.

Висновки до розділу:

Ключовим показником БСМ, що визначає їх застосовність на практиці, є час життя БСМ, завдання його збільшення як і раніше є актуальним.

У цьому розділі розроблені математичні моделі для бездротових ad hoc мереж, а також перераховані основні параметри мережі, що впливають на її поведінку і продуктивність. Розроблена модель топології дозволяє моделювати постійно змінювану структуру розглянутих мереж. Запропоновані моделі мережевого навантаження дозволяють моделювати трафік мереж спеціального призначення. Для моделювання трафіку загального призначення розглянуті стандартні моделі мережевого навантаження.

3. Методи управління інтелектуальними БСМ з мобільними сенсорами

3.1. Принципи формування БСМ

Кластеризація є одним з методів зменшення споживання енергії вузлами БСМ [18], а також одним з кращих варіантів зменшення інформаційного потоку. Можливо також застосувати інші підходи до побудови ієрархічної БСМ, наприклад, кластерні кільця [37]. Ієрархічний принцип побудови БСМ є, по суті, методом структурної оптимізації. З метою використання переваг, властивих таким мережам, уявімо БСМ, як запропоновано в роботі [45] на основі гіперграфу (в окремому випадку можливе подання у вигляді мультиграфу):

$$G(N^{\Theta}, I), \quad (3.1)$$

де N^{Θ} - множина вершин гіперграфу, яка є безліччю пікомереж (Спеціально об'єднане підмножинами вузлів БСМ), індекс Θ показує, що ця множина є пікомережею; I - множина інформаційних потоків.

Множина вершин гіперграфу складається з p -пікомереж, утворених в БСМ:

$$N^{\Theta} = \{N_1^{\Theta}, N_2^{\Theta}, \dots, N_p^{\Theta}\}, \quad (3.2)$$

де p - кількість пікомереж в БСМ.

Множина ребер гіперграфу є множиною інформаційних потоків:

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_j\}, \quad (3.3)$$

де j - кількість інформаційних потоків в БСМ, які виникають між пікомережі.

Зображення БСМ, описане виразом (3.1), наведено на рис. 3.1.

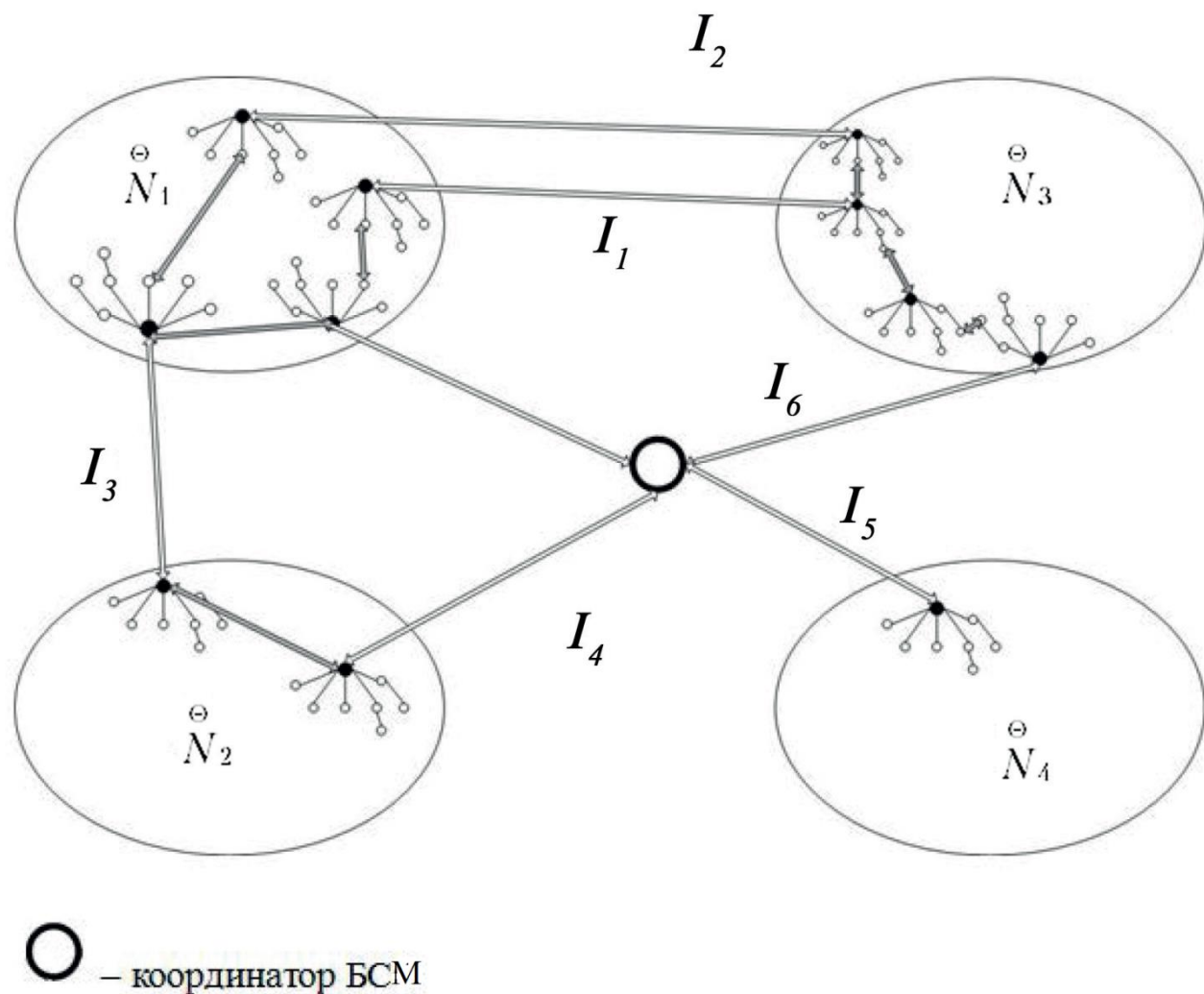


Рис. 3.1. Графова модель бездротової сенсорної мережі

Як видно з рис. 3.1 в якості вузлів графа G виступає пікомережа з внутрішньої кластеризацією. Такий підхід дозволяє застосувати алгоритмічну теорію графів, а також поточкові моделі в рамках одного алгоритму.

3.2. Визначення інтенсивності інформаційних потоків

Інтенсивність інформаційних потоків між пікомережами буде залежати від виду і характеру трафіку, а також вирішуваної задачі збору мережею. В ході аналізу літератури було встановлено, що трафік усередині БСМ приймає стохастичний характер і має ознаки самоподібності.

Таким чином, інтенсивність інформаційних потоків можна характеризувати як функцію, залежну від ряду критеріїв, наприклад для потоку I_1 :

$$\lambda_1 = F(k_1, k_2, \dots, k_n), \quad (3.4)$$

де λ_1 - інтенсивність інформаційного потоку; $k_1 - k_n$ - фактори, які впливають на інтенсивність потоку λ_1 ; n - кількість факторів, що впливають на потік I_1 .

У формулі 3.4 фактори які впливають на інтенсивність потоку можуть мати прямий або зворотний характер, тобто зменшувати або збільшувати потік.

Для забезпечення QoS і недопущення перевантаження каналів зв'язку інтенсивність потоку повинна задовольняти умову:

$$\lambda_k \leq \varphi_t, \quad (3.5)$$

де φ_t - пропускна здатність каналу для t -го тракту передачі; t - номер тракту передачі, k - номер потоку.

Одна з проблем вивчення трафіку БСМ полягає в тому, що характеристики трафіку в таких мережах значною мірою залежать від програми або сценарію роботи БСМ [46]. Тому визначити інтенсивність потоку без визначення моделі збору інформації практично неможливо.

З метою уніфікації алгоритму управління потоком і для можливості застосування багатошляхової маршрутизації припустимо можливість передачі даних вузлом-відправником з однієї пікомережі на безліч вузлів отримувачів пікомережі, яка приймає дані, як показано на рис.3. 2:

$$N_k = (n_k^1, n_k^2, \dots, n_k^z), \quad (3.4)$$

де N_i - множина вузлів-одержувачів для потоку i ; n_k^1, \dots, n_k^z - приймаючі вузли; z - кількість вузлів-одержувачів пов'язаних з потоком I_k .

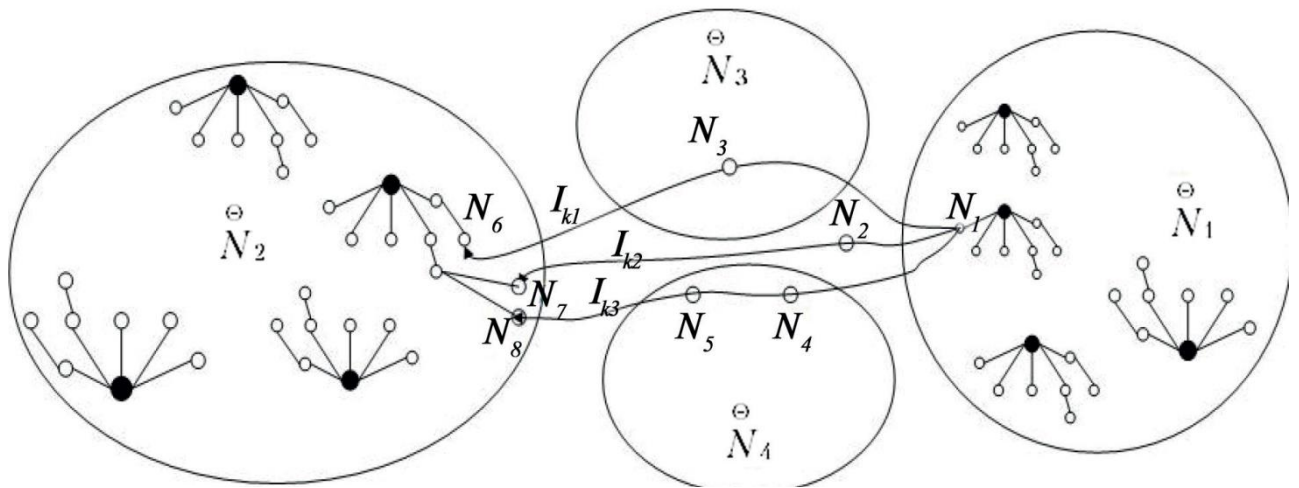


Рис. 3.2. Багатошляхова маршрутизація з однієї пікомережі в іншу

Як показано на рис. 3.2 передача даних з пікомережі N_1^Θ (вузол N_1) проходить трьома різними маршрутами на вузли одержувачі N_6, N_7, N_8 в пікомережі N_2^Θ . Маршрути потоку I_k проходять через пікомережі N_3^Θ, N_4^Θ , а також вузол N_2 , який ще не увійшов до жодної пікомережі.

3.3. Методи управління інформаційними потоками у інтелектуальній БСМ.

Інформаційні потоки, які приходять на пікомережу N_k^Θ можна представити у вигляді матриці $\|P_k\|$:

$$P_k = \underbrace{\left\| \begin{array}{cccc} i_{11} & i_{12} & \dots & i_{1m} \\ i_{21} & i_{22} & \dots & i_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_{n1} & i_{n2} & \dots & i_{nm} \end{array} \right\|}_{V} I_1, I_2, \dots, I_n, \quad (3.5)$$

де n - кількість потоків, що приходять на пікомережу N_k^Θ ; $V \in (1, m)$ - необхідна кількість передач для потоків $I_1 - I_n$, кількість стовпців дорівнює кількості передач m .

Звертаючи увагу на те, що різні потоки інформації вимагають виконання різної кількості часу на обслуговування, введемо матрицю - стовпець $\|T\|$, яка показує, скільки часу необхідно на виконання n -го потоку:

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ \dots \\ t_n \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де t_n - час на виконання n -го потоку.

Вузли інтелектуальних бездротових сенсорних мереж мають пам'ять [38], яку пропонується використовувати для створення буфера інформації що збирається. Як відомо з проведених аналізів енергоспоживання вузла БСМ [1, 38, 54], основна частина енергії джерела живлення витрачається вузлом на прийом і передачу даних, а не на її обробку. Тому пропозиція створення буфера інформації, що збирається є виправданим з точки зору зменшення енерговитрат вузла БСМ, актуальність чого підкреслювалася в роботах [31, 38].

Для оптимізації відправки пакетів і управління потоком даних пропонується адаптивний алгоритм управління роботою прийоμο-передавачного вузла БСМ.

Розглянемо можливі фактори, які впливають на тривалість роботи прийоμο-передавача:

- модель збору інформації визначає тимчасові інтервали для інформаційного обміну;
- приймає вузол зайнятий обробкою іншого потоку;
- вузол знаходиться в стадії конфігурації мережі;
- обсяг переданих даних;
- пропускна здатність каналу;
- віддаленість вузла-одержувача і ін.

Пропонується ввести поняття «Ранок», «День», «Вечір», «Ніч» для алгоритму. «День» - стан, коли вузол може передати дані, означає, що вузол-приймач може прийняти ці дані. «Ніч» - вузол-одержувач не може прийняти дані, так як можливо зайнятий прийомом інших даних, вузлу-відправнику

забороняється передавати дані. «Вечір» - вузлу-одержувачу прийшла нова заявка або він йде в «сплячий» режим. «Ранок» - вузол-отримувач зібрав необхідні дані і готовий їх передати. З урахуванням введених понять алгоритм управління передавачем наведено на рис. 3.3.

Класичним способом синхронізації потоків в обчислювальних ядрах процесорів є використання семафорів. Цей метод пропонується використовувати і для БСМ з метою обмеження доступу до деяких вузлів, в першому випадку - з заданою кількістю потоків, у другому - до вузлів, які приймають аварійну сигналізацію, яка повинна передаватися з мінімальними затримками і втратами. Як і в класичному випадку, пропонується використовувати семафори з лічильниками, якщо деякі вузли виділялися з безлічі ідентичних. При ініціалізації такого семафора в його лічильнику вказується число обслуговуючих потоків S . Кожна операція «очікування» зменшує значення лічильника семафора на 1, показуючи, що деякому потоку виділено один ресурс з можливої кількості обслуговуючих потоків.

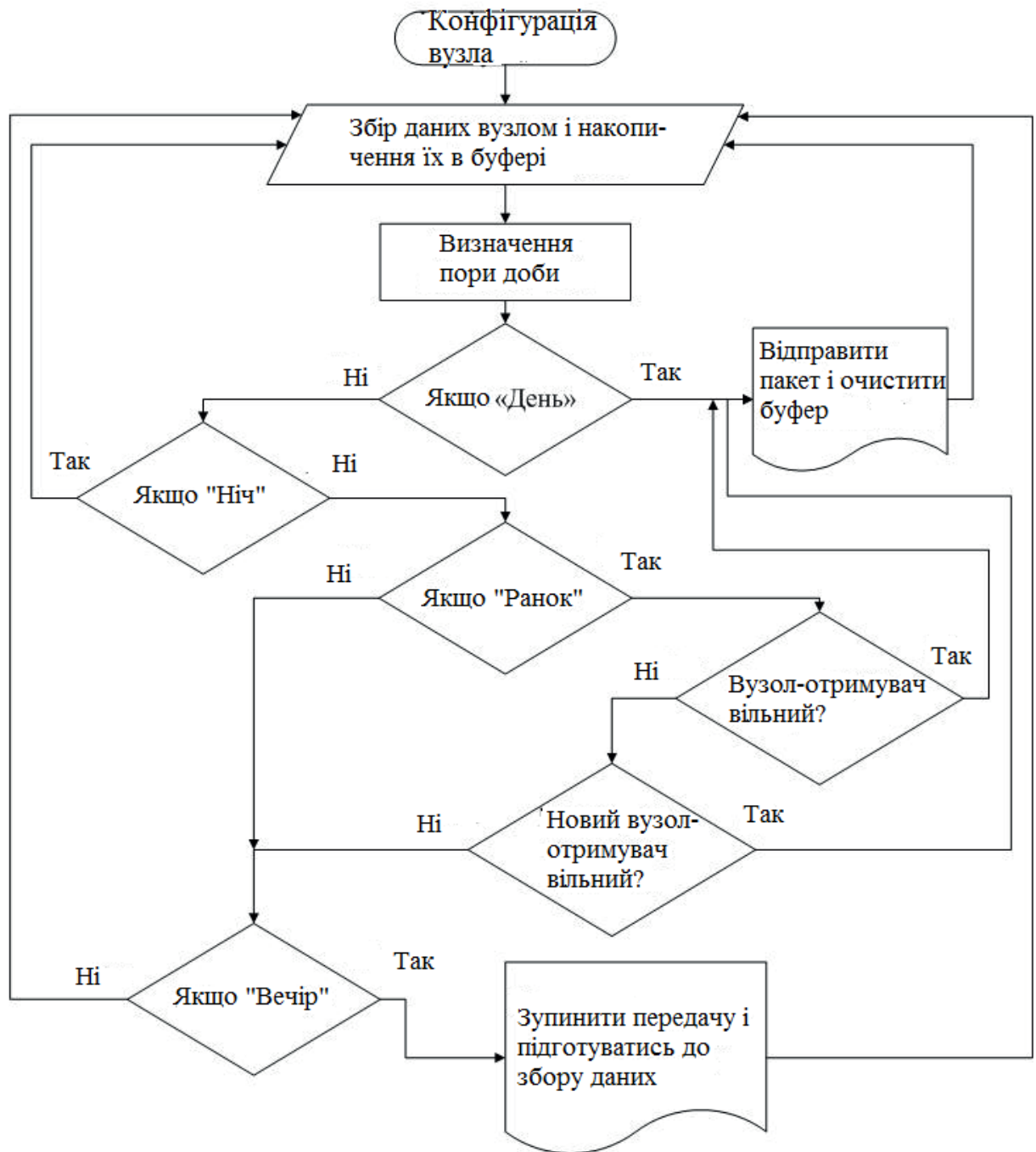


Рис. 3.3. Алгоритм управління передачі даних для вузла БСМ

Протоколи маршрутизації - як дистанційно-векторні, що засновані на Distance Vector Algorithm (DVA), так і стан зв'язків, що засновані на Link State Algorithm (LSA), визначають для трафіку, спрямованого в конкретну пікомережу, найкоротший маршрут відповідно до деякої метрики. Як метрики в класичних телекомунікаційних мережах (ТКМ) розглядають номінальну пропускну здатність каналів зв'язку, затримки на проміжних вузлах. У БСМ для

метрики використовують: рівень заряду джерел живлення вузлів [31], низьку затримку [21], трастову оцінку [32].

В ході аналізу літератури було відзначено, що в БСМ характеристики трафіку, а, отже, і інформаційні потоки в значній мірі залежать від моделі збору інформації або сценарію роботи БСМ. Тому з метою вибору критеріїв оптимізації інформаційного потоку в БСМ пропонується використовувати матрицю критеріїв, яка будується для кожного набору потоків між пікомережами:

$$H_{\mu,\eta} = \left\| \begin{array}{cccc} \xi_{11} \cdot k_{11} & \xi_{12} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{1m} \cdot k_{1m} \\ \xi_{21} \cdot k_{11} & \xi_{22} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{2m} \cdot k_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{n1} \cdot k_{11} & \xi_{n2} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{nm} \cdot k_{nm} \end{array} \right\|_{I_1, I_2, \dots, I_n}, \quad (3.7)$$

де ξ_{nm} – ваговий коефіцієнт впливу фактора коефіцієнт впливання фактора k_{nm} в інформаційному потоці I_n між пікомережами μ і η .

Для оптимізації управління інформаційним потоком пропонується використовувати мурашиний алгоритм. На сьогоднішній день існує п'ять основних модифікацій мурашиного алгоритму Elitist Ant System, Ant-Q, Ant Colony System, Max-min Ant System, ASrank.

Мурашині алгоритми підходять для реактивних протоколів маршрутизації, де маршрути існують тільки тоді, коли вони необхідні, тобто коли по ним ведеться передача даних. Даний метод співвідноситься з введеним нами алгоритмом управління передачею даних для вузла БСМ

Реактивний протокол працює наступним чином: при необхідності передати дані, вузол-джерело починає трансляцію розсилку повідомлення. Обробляючи її, проміжні вузли додають маршрут до вузла-джерела (зворотний маршрут), і продовжують його трансляцію розсилку. Коли повідомлення доходить до вузла призначення, він формує повідомлення-підтвердження і відправляє його по вже сформованому зворотному маршруту..

Для того, щоб побудувати мурашиний алгоритм, необхідно [41]:

- представити мережу у вигляді набору неорієнтованих зважених графів, за якими мурахи можуть будувати рішення;
- визначити значення сліду феромона;
- визначити евристику поведінки мурахи під час побудови рішення;
- встановити, чи можливий локальний пошук;
- дослідним шляхом налаштувати параметри мурашиного алгоритму;
- також, в нашому випадку, визначити, які пікомережі братимуть участь в алгоритмі.

Мураха рухатиметься від вузла i до вузла j , використовуючи імовірнісно-пропорційне правило з імовірністю:

$$P_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^\alpha \left(\frac{1}{w_{i,j}}\right)^\beta}{\sum_{j \in M} \tau_{i,j}^\alpha \left(\frac{1}{w_{i,j}}\right)^\beta}, \quad (3.8)$$

де $\tau_{i,j}$ - кількість феромонів на ребрі від вузла i до вузла j ; $w_{i,j}$ - відстань між вузлами i та j ; M - безліч вузлів, які може відвідати мурашки;

α - коефіцієнт, який контролює вплив кількості феромонів $\tau_{i,j}$; β - коефіцієнт, контролюючий відстань між вузлами i та j на вибір мурашки.

Після того, як мурашка успішно проходить маршрут по вузлах, вона залишає на всіх пройдених ребрах слід феромонів, обернено пропорційний довжині пройденого шляху:

$$\Delta\tau_{ij,k} = \begin{cases} \frac{\chi}{L_k}, & (i,j) \in T_k, \\ 0, & (i,j) \notin T_k, \end{cases} \quad (3.9)$$

де χ - регульований параметр; k - мураха під номером k ; L - довжина шляху, пройдена мурахою k ;

$\Delta\tau_{ij,k}$ - кількість відкладеного феромона мурахою k .

Оновлення феромонів в класичному випадку відбувається за правилом:

$$\tau_{ij} = (1 - p)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}, \quad (3.10)$$

де p - швидкість випаровування феромону; $\tau_{i,j}$ - кількість феромонів на ребрі від вузла i до вузла j .

У мурашиний алгоритм введемо принцип семафора з трьома станами. Нехай вузол j БСМ передає аварійну сигналізацію, тоді мураха не може на нього

піти - семафор «Червоний», а мурашки не прокладає по цій дузі феромон. У разі обслуговування вузлом потоку семафор - «Жовтий», мураха може піти, і відкласти феромон, але з меншим коефіцієнтом. У разі відсутності обслуговування потоку семафор - «Зелений», мураха застосовує класичний метод.

Введемо в формулу (3.8) запропонований принцип семафора:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \left(\frac{1}{w_{ij}} \right)^{\beta}}{\sum_{j \in M} \tau_{ij}^{\alpha} \left(\frac{1}{w_{ij}} \right)^{\beta}} S, \quad (3.11)$$

де S - стан семафора.

Семафор приймає значення:

$S = 0$, при «Червоному» сигналі;

$S = 1$, при «Зеленому», сигналі;

$0 < S < 1$, при «Жовтому» сигналі.

Запропонований принцип роботи мурашиного алгоритму дозволяє організувати передачу аварійної інформації, яка повинна передаватися з найвищим пріоритетом.

Ідею розробленого алгоритму управління передачею даних для вузла БСМ з метою оптимізації можна також перекласти на мурашиний алгоритм. Нехай мурахи проводять дослідження в мережі тільки «Вдень». «Вранці» йде процес оновлення феромонів. У режимах «Вечір» і «Ніч» дослідження мережі не проводяться. Якщо використовувати локальний час для кожної пікомережі N_p^{\ominus} , то виходить, що в різних сегментах мережі, процес оновлення феромонів буде розсинхронізований. Такий підхід можна використовувати в разі, коли

пікомережа є великою мережею, так як мурашині алгоритми ефективні при online оптимізації процесів в розподілених нестационарних системах, якими є трафік в мережах.

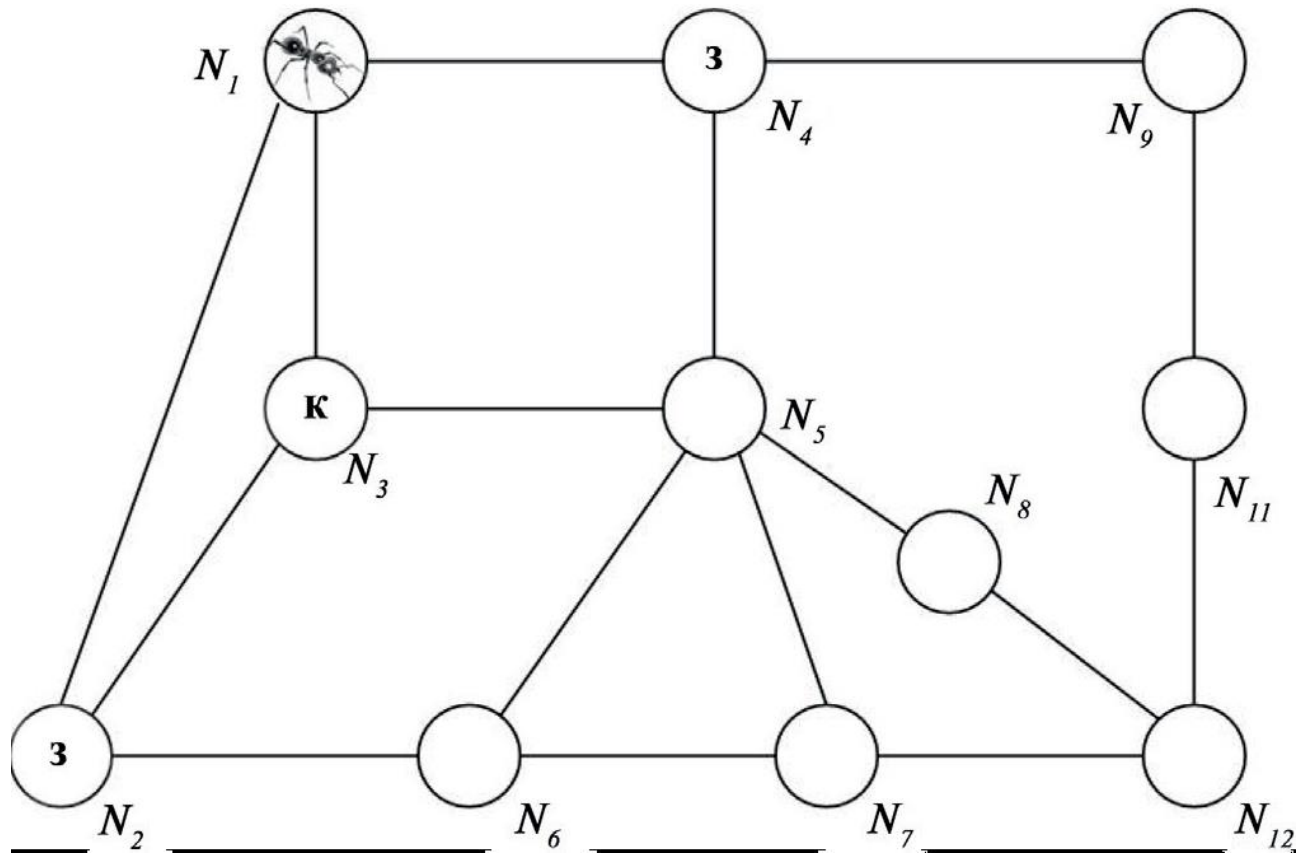


Рис. 3.4. Робота мурашиного алгоритму зі застосуванням semaфорів

Як видно з рис.3.4, у мурашки, яка знаходиться на вузлі N_1 , є можливість піти тільки на вузли N_2 і N_4 , де горить «Зелений», в той час як вузол N_3 обслуговує вузол з високим пріоритетом.

3.4. Методика управління топологією інтелектуальних безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами

Однією з основних задач, які потребують вирішення при проектуванні безпроводових сенсорних мереж (БСМ) із самоорганізацією, без сумніву є задача маршрутизації потоків даних з інформацією моніторингу, що передається від сенсорів (як стаціонарних, так і мобільних) до центрів обробки

інформації. У випадку, коли БСМ складається з мобільних сенсорів, або в якості ретрансляторів інформації моніторингу використовуються мобільні наземні сенсорні вузли (шлюзи) чи вузли на базі безпілотних літальних апаратів (БЛА), вирішення задачі маршрутизації значно ускладнюється через часті зміни топології БСМ

У такому випадку для ефективної реалізації методів маршрутизації в [9] авторами запропоновано введення додаткового підрівня управління топологією БСМ на мережевому рівні моделі OSI. Під топологією БСМ розуміють сукупність вузлів на місцевості та каналів, які їх з'єднують у взаємному розташуванні. Топологія визначає потенційні можливості БСМ з доставки даних між взаємодіючими вузлами.

Передбачається, що кожен вузол i може змінювати потужність передачі $p_i = [p_{imin} \dots p_{imax}]$ з певним кроком дискретизації Δp . Зростання потужності передачі вузлів зменшує кількість ретрансляцій в маршруті i , відповідно, зменшує затримку передачі повідомлення, але приводить до зростання рівня взаємних завад і зменшення пропускної спроможності мережі. В свою чергу, зменшення потужності передачі вузлів знижує загальну потужність, що витрачається (нагадаємо, що частина вузлів обладнана батареями) і тим самим підвищує „час життя” мережі та її пропускну спроможність. Однак, це приводить до зростання довжини маршрутів передачі (діаметра мережі) i , відповідно, до зростання часу доставки повідомлень і навіть до розділення мережі на незв'язні компоненти. Також вузол i може бути обладнаний V -секторною направленою антеною, яка володіє можливістю передачі одночасно в β секторах $1 \leq \beta_i \leq V$ і утворює β_i діаграму направленості.

Під управлінням топологією БСМ будемо розуміти управління U_T , що змінює топологію БСМ в процесі її функціонування за рахунок перерозподілу потужності передачі вузлів p_i (та/або направленості їх антен β_i) з метою Z_k , $k = \overline{1, K}$:

– Z_1 – забезпечення зв'язності мережі (зв'язності між вузлами i та j – $cv_{ij} = 1$);

– Z_2 – користувальницької оптимізації – виконання вимог до маршрутизації інформаційних повідомлень [10] (наприклад, з оперативності доставки повідомлень між парою відправник-адресат);

– системної оптимізації: Z_3 – максимізація пропускної спроможності мережі ($\max S$), Z_4 – мінімізація часу затримки передачі повідомлень ($\min \bar{t}_3$), Z_5 – мінімізація потужностей передач вузлів ($\min \bar{P}$), Z_6 – мінімізація кількості однонаправлених каналів ($\min E_0$) та ін.

Для підвищення ефективності функціонування БСМ із самоорганізацією, підсистему маршрутизації (як складову частину системи управління) необхідно реалізувати на двох рівнях: на верхньому рівні проводиться оперативне управління топологією мережі (створення потенційних маршрутів передачі інформації); на нижньому – управління побудовою та підтриманням маршрутів при отриманій топології (реалізувати конкретний метод маршрутизації з їх сукупності) [11]. Верхній і нижній рівні працюють в різних часових інтервалах. Цикл управління маршрутами значно менший циклу управління топологією. Співвідношення циклів управління повинно бути таким, що на кожному кроці топологічних змін повинен відбуватися весь цикл управління маршрутами. Тільки в цьому випадку можливе досягнення ефективності реалізованої топології.

Задача управління топологією формулюється наступним чином: у фіксований момент часу t необхідно відшукати матрицю зв'язності вузлів CV_k^* , яка забезпечує виконання k -ої цілі управління користувальницької або системної оптимізації БСМ.

Математична модель. БСМ представляється у вигляді стохастичного графа $G = (V, E)$ з множиною вершин $V = \{v_i\}$ і множиною ребер $E = \{(i, j) \mid d_{ij} \leq r_i \wedge d_{ij} \leq r_j\}$, які визначають матрицю зв'язності $CV = \|cv_{ij}\|$, де $cv_{ij} = \{0, 1\}$ – булева змінна, d_{ij} – відстань між вузлами i та j для $i \neq j$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, $r_i(p_i)$ – радіус (потужність) передачі i -го вузла. Кожен вузол графа v_i

в момент t описується сукупністю параметрів: координати розташування (x_i, y_i) ; радіус (потужність) передачі $r_i = [r_{i\min} \dots r_{i\max}]$; направленість антени β_i ; ємність батареї $e_i^{\bar{0}}$; швидкість і напрямок переміщення v_i, γ_i ; маршрутна таблиця найкоротших шляхів $\Pi_i = \left\| l_{\eta}(\pi_{ij}^{(k)}) \right\|$, де $k = \overline{1, N}$, $(i, j) \in E$, $\pi_{ij}^{(k)} = \{0, 1\}$ – маршрутна змінна, що визначає відсутність (наявність) маршруту від відправника i до адресата k через сусідній вузол $j \in N_i$, l_{η} – довжина найкоротшого маршруту, $\eta = \overline{1, N}$ – позитивні метрики (наявність радіозв'язку – η_1 , пропускна спроможність – η_2 , затримка передачі – η_3 , потужність передачі – η_4 , відстань – η_5 та ін.). Інтенсивність вхідних потоків визначається матрицею тяжінь $\Gamma = \|\gamma_{jk}(t)\|$, $\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \gamma_{jk} \leq \gamma_{\max}$ для $j \neq k$, пропускна спроможність радіоканалу $s_{ij} \leq s_{ij\max}$, $\forall (i, j) \in E$; радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним з протоколів канального рівня (випадковий, з контролем несучої та ін.).

Необхідно: знайти в режимі реального часу матрицю зв'язності CV^* (визначити радіус передачі $r: V \rightarrow \mathbb{R}^+$ та/або направленість антен $\beta: V \rightarrow \mathbb{R}^+$), що забезпечує виконання цільової функції Z_k , $k = \overline{1, K}$

$$CV_k^* = \arg \underset{U_{\delta} \in \Omega_{\delta}}{\text{opt}} Z_k(\tilde{N}V), \quad (3.12)$$

при виконанні обмежень на множину управляючих впливів та ресурси мережі Ω_{τ}

$$\Omega_{\tau}: \{t_3 \leq t_{3\text{доп}} (l_{\eta}(\pi_{ij}^{(k)}) \leq l_{\eta\text{доп}}); g_{ij} \leq s_{ij}(cv_{ij}), r_i \leq r_{i\max} (p_i \leq p_{i\max}), e_i^{\bar{0}} \leq e_{i\max}^{\bar{0}} \},$$

де t_3 – затримка передачі, g_{ij} – інтенсивність потоків пакетів, що поступають за всіма маршрутами m_{ab} , які проходять через даний канал (i, j) –

$$g_{ij} = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, (i, j) \in m_{ab} - \text{маршрут з відправником у вузлі } a \text{ і отримувачем } b; a,$$

$b, i, j \in V$.

Складність і результат рішення CV^* залежить від цільової функції управління Z_k , $k = \overline{1, K}$ і типу управління: централізованого (зонового)

управління мережею (виникає при ієрархічній організації БСМ великих розмірів [6]) і децентралізованого. Основна задача управління топологією полягає у задоволенні показників якості обслуговування потоків даних при максимізації пропускної спроможності мережі – Z_3 . В цьому випадку цільова функція та обмеження матимуть вигляд

$$CV_3^* = \|cv_{ij}^*\| = \arg \max_{U_\delta \in \Omega_\delta} S(\tilde{N}V) = \arg \max_{U_\delta \in \Omega_\delta} \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), \quad (3.13)$$

$$\Omega_T: \{t_3(m_{ab}) \leq t_{3\text{доп}} (l_{ab}(m_{ab}) \leq l_{\text{доп}}); s(m_{ab}) \geq s_{\text{доп}}, g_{ij} \leq s(cv_{ij}), r_i \leq r_{i\text{max}}, e_i^{\bar{6}} \leq e_{i\text{max}}^{\bar{6}}\}, \quad (3.14)$$

де $S(CV)$ – пропускна спроможність мережі; $i, j, a, b \in V$; $s(m_{ab})$ – пропускна спроможність маршруту $m_{ab} = \overline{1, M}$ у відповідності з прийнятими маршрутними рішеннями Π_i ; $s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m_{ab}} \{s(cv_{ij})\}$, $cv_{ij} = \{0, 1\}$; t_3, l – затримка передачі (кількість ретрансляцій) повідомлень за маршрутом m_{ab} ; $r_i(p_i)$ – радіус (потужність) передачі i -го вузла; $p(m_{ab}) = \sum_{(i,j) \in m_{ab}} (k_1 d_{ij}^\alpha + k_2)$, $\alpha = 2 \dots 4$, k_1 і k_2 –

константи; $s_{\text{доп}}, t_{3\text{доп}}, l_{\text{доп}}$ – допустимі значення вищезазначених параметрів.

Цикл управління топологією БСМ із самоорганізацією включає в себе наступні етапи: збір інформації про стан і параметри функціонування мережі або її зони (інформація може бути отримана при функціонуванні одного з методів маршрутизації [12]); розрахунок і оцінку характеристик її функціонування; знаходження нової топології мережі (у випадку відхилення параметрів функціонування від допустимих значень), яка реалізує ціль управління вузла Z_k і доведення до вузлів прийнятого рішення (потужність передачі та/або направленість антени). Алгоритм оперативного управління топологією БСМ включає наступні кроки (рис. 3.5).

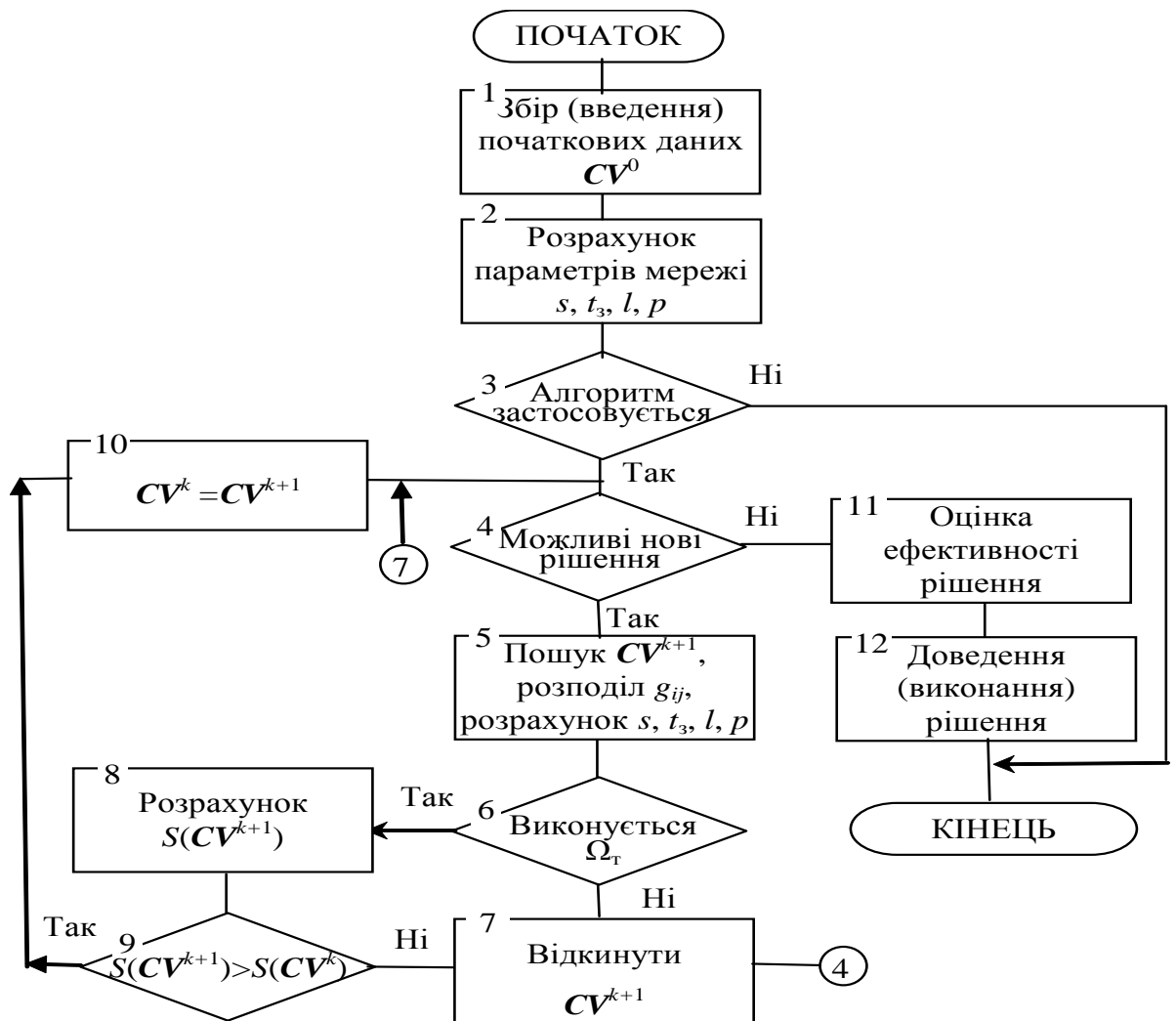


Рис.3.5 – Схема-алгоритм управління топологією БСМ

Крок 1. Збір інформації про стан мережі (зони мережі) і введення вихідних даних (блок 1 алгоритму):

а) параметри вузлів мережі: N ; (x_i, y_i) , $r_i(p_i)$, β_i (визначають топологію мережі – CV^k , де $k = 0$ – номер ітерації пошуку рішення), $e_i^{\bar{b}}$, v_i , γ_i , Π_i , g_{ij} , $i, j \in V$; протокол доступу до каналу.

б) значення допустимих значень в (3.14): $s_{\text{доп}}$, $t_{\text{здоп}}$, $l_{\text{доп}}$, $r_{i\text{макс}}$ ($p_{i\text{макс}}$), $e_{i\text{макс}}^{\bar{b}}$.

Крок 2. Аналіз умов застосовності алгоритму для вихідної топології CV^0 (бл. 2, 3).

а) Розрахунок параметрів мережі s , t_3 , l , p для активних пар a - b відправник-адресат.

б) Перевірка виконання обмежень Ω_T (3).

При задоволенні всіх умов – закінчити алгоритм (перебудувувати топологію нема необхідності, так як функціонування методу маршрутизації забезпечує необхідну якість передачі пакетів), інакше – перехід до кроку 3.

Крок 3. Аналіз можливості отримання нової топології (бл. 4).

Якщо рішення існує, тоді перехід до кроку 4, інакше – оцінити ефективність отриманого рішення, довести його до вузлів і завершити алгоритм (бл. 11, 12).

Крок 4. Пошук допустимої топології (бл. 5 – 10).

а) Пошук нового рішення – CV^{k+1} .

б) Побудова маршрутних таблиць – $\Pi_i(CV^{k+1})$, що визначаються матрицею тяжінь Γ і прийнятим методом маршрутизації.

в) Перерозподіл потоків g_{ij} відповідно $\Pi_i(CV^{k+1})$.

г) Розрахунок параметрів s , t_3 , l і p для існуючих пар відправник-адресат.

д) Перевірка виконання обмежень (3) для CV^{k+1} .

Якщо (3) не виконується або $S(CV^{k+1}) < S(CV^k)$, тоді відкинути – CV^k , інакше $CV^k = CV^{k+1}$.

в) Перейти до кроку 3.

В основі запропонованого алгоритму міститься розрахунок параметрів БСМ (пропускної спроможності і середнього часу затримки доставки повідомлень) з допомогою аналітичних моделей [13] враховуючи можливість використання направлених антен [14].

Задача пошуку матриці зв'язності CV^* (1) відноситься до класу NP-повних [16]. Використання для її вирішення класичних методів приводить до експоненціальної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує десятки (сотні) вузлів, пов'язане зі значними часовими затратами. Тому для скорочення перебору топологій запропоновано використовувати множину правил, об'єднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для покращення її параметрів. Це дозволяє отримати в реальному масштабі часту близькі до оптимальних рішення та використовувати алгоритм для

оперативного управління БСМ. Критерієм визначення моменту перебудови топології мережі є невиконання однієї з умов обмеження Ω_T .

Використання бази знань (у відповідності з алгоритмом) включає в себе ітераційну процедуру (що складається з модулів АНАЛІЗ, БАЗА ЗНАНЬ, УПРАВЛІННЯ), яка працює в наступній послідовності (рис. 3.6):

1. Аналіз поточного стану мережі (розрахунок параметрів БСМ з допомогою аналітичної моделі [13]).

2. Перевірка параметрів мережі на множині правил. Якщо немає умов для виконання правил, то процедуру закінчити, інакше – використати правила з бази знань для змінення зв'язності мережі.

3. Обчислення параметрів модифікованої мережі. Якщо параметри покращилися, то перехід до кроку 2, інакше – відкинути останню зміну зв'язності і перехід до кроку 2.

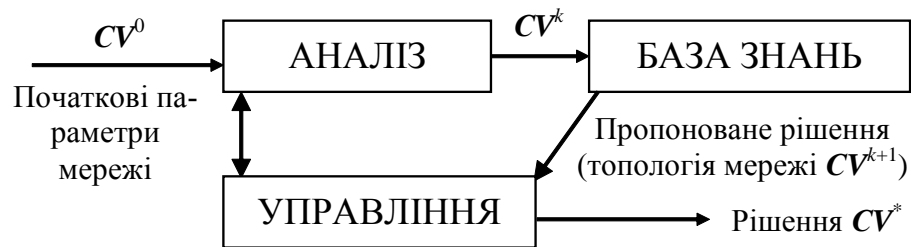


Рис.3.6 – Схема отримання рішення з використанням бази знань

Модуль АНАЛІЗ призначений для знаходження пропускнуєї спроможності мережі S , середньої затримки передачі пакетів t_3 за маршрутами при заданому вхідному навантаженні Γ , маршрутних рішеннях Π , зв'язності CV і протоколі доступу до каналу з допомогою математичних моделей [13].

Модуль БАЗА ЗНАНЬ містить правила, які забезпечують цілеспрямовану зміну зв'язності, використовуючи отримані параметри з модуля АНАЛІЗ. Правила продукційного типу, складаються з двох компонент: умова та дія [10]. Умова визначає можливість застосування правила в кількісному вираженні, а дія використовується для задоволення умови та описує зміни зв'язності мережі, що ведуть до системної або користувальницької оптимізації: $\text{Pr}_i: \alpha_i \rightarrow \beta_i$, де

Pr_i – i -е правило, α_i – умова, β_i – дія. Для уникнення комбінаторного вибуху кожна дія міняє зв'язність з одним із вузлів при мінімальних змінах потужності передачі вузла.

Модуль УПРАВЛІННЯ визначає момент закінчення застосування правил та виконує роль інтерпретатора [17], працюючи циклічно. В кожному з циклів він переглядає всі правила, щоб виявити ті, посилення яких співпадають з відомими на даний момент фактами з робочої пам'яті. Після вибору правило спрацьовує, його висновок заноситься до робочої пам'яті, а потім цикл повторюється спочатку. В одному циклі може спрацювати тільки одне правило. Якщо кілька правил успішно співставлені з фактами, та інтерпретатор на основі метаправил проводить вибір єдиного правила, метаправила визначають надання переваги правилам у залежності від k -ої цілі управління мережею (МПр $_i$: $Pr_i \rightarrow w_i^k$). Те правило, яке в найбільшій мірі покращує параметри буде мати найбільшу вагу w_i^k .

Ключовою особливістю в запропонованій процедурі є база знань. Правила бази знань працюють у відповідності з різними цілями управління мережею Z_k (рис. 3.7). Управляємими параметрами є складові структури мережі (ступінь зв'язності, кут і взаємне розташування вузлів, діаметр мережі та ін.) і параметри вузла (навантаження, ємність батареї і т. д.). відповідно, структурні правила аналізують структуру графа мережі і намагаються створити структуру мережі, що володіє найвищою продуктивністю. Потоківі – виявляють перевантажену ділянку мережі і намагаються перенаправити повідомлення за маршрутами з меншою завантаженістю. Всі правила, незалежно від цілі управління, визначають одну із двох можливих дій – збільшення або зменшення потужності передачі вузла (зміна направленості його антени), що приводить до збільшення або до зменшення кількості вузлів, які приймають дану передачу.

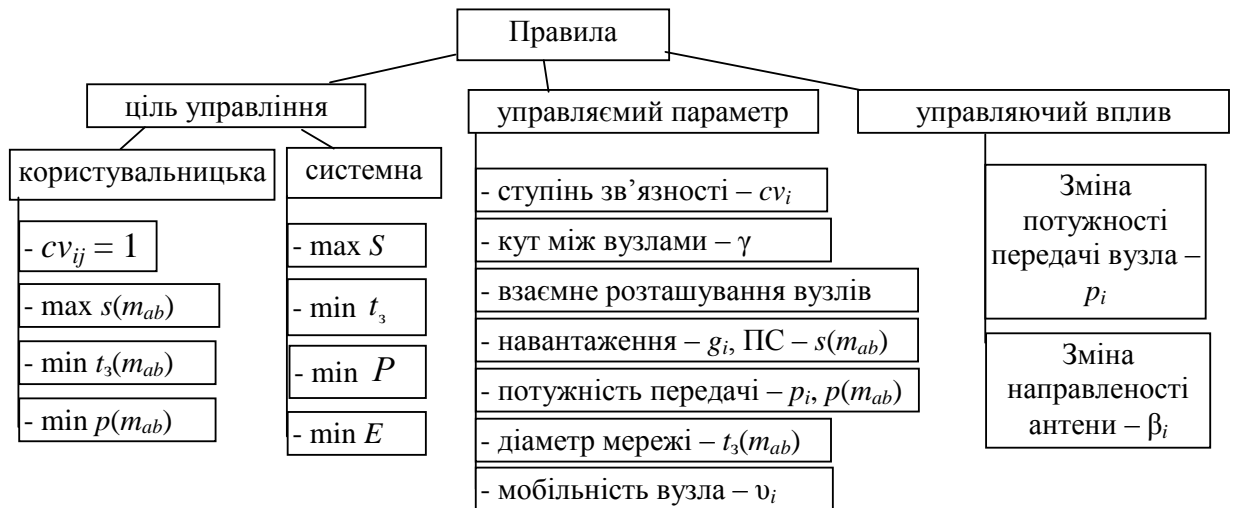


Рис.3.7 – Класифікація правил бази знань

Структурні правила отримані в результаті експериментальних досліджень структури мережі і теорії графів [18]. Вони спрямовані на покращення параметрів мережі. В якості прикладу можна привести ряд структурних правил.

Правило 1: *Якщо поточне значення ступеня зв'язності вузла i – $cv_i > cv_{opt}$ ($cv_i < cv_{opt}$), тоді зменшити (збільшити) i -у потужність передачі.*

В основу даного правила покладені результати досліджень Л. Клейнрока про так зване „магічне число” – оптимальну ступінь зв'язності вузлів мережі cv_{opt} [17]. Дані дослідження показали, що мережі з однаковим ступенем зв'язності (регулярною структурою) мають більшу пропускну спроможність, ніж мережі з нерегулярною структурою. Тому використовуються два правила. Одне „вмикається”, коли $cv_i > cv_{opt}$, а інше у випадку $cv_i < cv_{opt}$. Величина cv , яка оптимізує пропускну спроможність БСМ, рівна $cv_{opt} = 6...8$ [17]. В загальному випадку cv_{opt} залежить від протоколу канального рівня, який використовується, і може бути розрахована на етапі проектування мережі [19] або отримано в процесі „навчання” вузлів на етапі її функціонування [13]. Якщо цілевою функцією є зв'язність мережі, то в роботах [20,21] показано, що для N випадковим чином розташованих вузлів кожен вузол повинен бути зв'язаний, в крайньому випадку, з $\Theta(\log N)$ сусідів. Ймовірність зв'язності мережі прямує до

нуля при $cv < 0.074 \log N$ ($\lim_{N \rightarrow \infty} P_{\text{CB}}(G(N, cv) = 0) = 0$) і одиниці при $cv > 5.1774 \log N$ ($\lim_{N \rightarrow \infty} P_{\text{CB}}(G(N, cv) = 1)$).

Розглянемо правила, що використовують в якості параметра величину кута між вузлами [21, 22].

Правило 2. Якщо кут $\gamma = jik$ „великий” і зростання i -ї потужності додасть канал (i, l) , що знаходиться між вузлами j та k (засобами цього зменшення величина кута між будь-якими двома вузлами, що приймають від i), тоді i -му вузлу збільшити потужність передачі.

Рис. 3.7а показує ситуацію, що визначає застосовність даного правила. Точками на рисунку показано канал, що створюється. Це вигідно в першу чергу для маршрутизації (додаткові маршрути передачі). Однак застосовність даного правила буде залежати від ситуації в мережі, наприклад, від ступеня зв'язаності вузла cv_i , рівня навантаження g_i і $g_j, j \in N_i$.

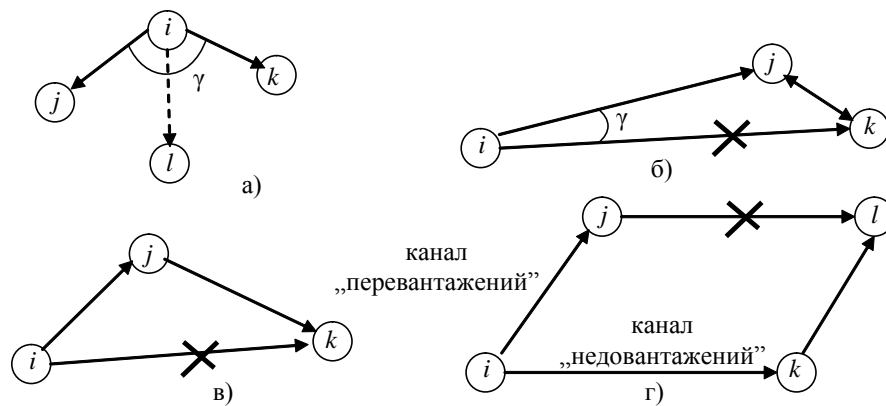


Рис.3.7 – Умови застосування правил

Правило 3. Якщо вузол i передає вузлам j та k , кут $\gamma = ijk$ „малий” і зниження i -ої потужності виключить канал (i, j) або (i, k) , тоді i -му вузлу зменшити потужність передачі.

Рис. 3.7б. показує структуру мережі для застосовності даного правила. Це правило каже про те, що при наявності „довгого” каналу в одному напрямку, ми підвищуємо завади іншим вузлам без помітного підвищення пропускну

спроможності. Виключаючи „довгий” канал при існуванні „короткого” в одному напрямку, ми забезпечимо виграш в пропускній спроможності мережі.

Низка правил отримані в дослідницьких роботах [20-26]. Наприклад, в [17] показано, що тандемний ланцюг має більшу пропускну спроможність завдяки своїй унікальній структурі. Тому сформульоване наступне правило, основане на взаємному розташуванні вузлів (рис. 3.7в).

Правило 4. Якщо вузол i передає вузлам j та k , вузол j також передає k , мале навантаження в каналі (i, k) та зменшення i -ої потужності дозволить виключити канал (i, k) , тоді i -му вузлу зменшити потужність передачі.

Правила, які використовують у якості параметра навантаження, отримані з теорії мереж з множинним доступом [17]. Ці правила розділяють канали, вузли за наступними категоріями: „перевантажений” та „недовантажений”. За цими означеннями правила виконують одну з двох функцій: „переміщення” частини навантаження із завантаженої ділянки мережі в зону з незначними навантаженням або повне виключення перевантаженої зони з процесу маршрутизації.

Правило 5. Якщо вузол i передає вузлу l за маршрутом $i-j-l$, канал (i, j) „перевантажений” і „недовантажений” канал (i, k) , при зменшенні j -ої потужності втрачається зв'язність з вузлом l , тоді зменшити потужність передачі j -му вузлу.

Це правило (рис. 3.7г) прагне перемістити навантаження з перевантаженого маршруту $i-j-l$ на маршрут $i-k-l$, який використовує слабо завантажений канал.

Правило 6. Якщо вузол i ретранслює повідомлення через вузол j , вузол j „перевантажений” і в його напрямку знаходяться інші ретранслятори, тоді вузлу i збільшити потужність передачі.

Правило 6 дає можливість зменшити навантаження на вузол j , забезпечуючи велику ймовірність знаходження ретранслятора в заданому напрямку і тим самим зменшити кількість переприйомів.

В роботах [27,28] доводиться, що ряд планарних графів RNG (*Relative Neighborhood Graph*) і GG (*Gabriel Graph*) володіють властивістю мінімізації потужності передачі в мережі. Побудова RNG графа з вихідного визначається згідно наступного правила: $\forall a \neq b, c : |cb| \leq \max(|ca|, |ba|)$ (рис. 3.8 а). GG-граф будується за наступним правилом: $\forall a \neq b, c : |cb|^2 \leq (|ca|^2 + |ba|^2)$ (рис. 3.8б). Доведено, що $MST(G) \subseteq RNG(G) \subseteq GG(G)$, де $MST(G)$ – остов мінімальної ваги.

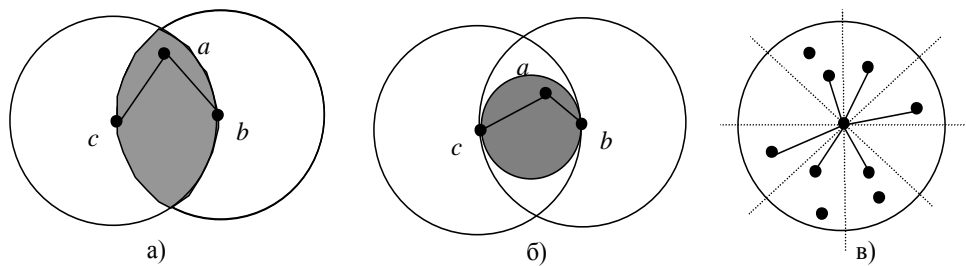


Рис.3.8– Правила побудови RNG, GG і YG_6 графів

Об'єднання першого і другого правила дозволяє будувати так званий Yao граф (YG) [28]. Побудова YG_B графа полягає в наступному: кожен вузол i ділить простір на $B \geq 6$ рівних секторів; в кожному секторі вибирається найближчий вузол (рис. 3.8в).

Таким чином, процес модифікації топології мережі можна представити у вигляді дерева пошуку рішень (рис. 3.9). Кожній вершині дерева відповідає певна топологія мережі, а ребрам – правила переходу з одного стану в інший. В корені дерева знаходиться початкова топологія CV^0 . Початкове рішення з топології мережі (найбільша вага правила) залежить від цілі оптимізації. Пошук рішення здійснюється шляхом покрокового сходження деревом рішень. На k -ому рівні дерева розташовані всі можливі топології мережі, отримані з початкової, при використанні k -правил.

Для зменшення ширини дерева пошуку замість всіх можливих комбінацій ми обмежуємося єдиною топологічною зміною – додаванням або відніманням одного радіоканалу (в передбаченні його граничної моделі). Порядок застосування правил визначають метаправила. Глибина пошуку обмежене

максимальним діаметром мережі або кількістю ретрансляцій (допустимим часом доведення пакетів) в маршрутах мережі, топологія якої синтезується.

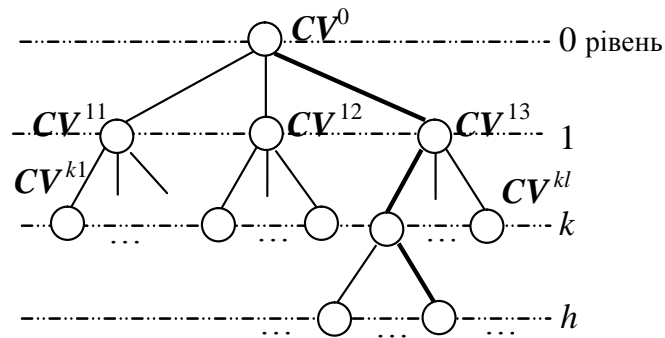


Рис.3.9– Дерево пошуку CV^*

Дослідження оцінки ефективності алгоритму оперативного управління БСМ проводилося для мережі різного розміру ($N = 20, 40, 60$) і середнього ступеня зв'язності ($\overline{cv} = 5 \dots 14$). Для проведення досліджень була здійснена програмна реалізація алгоритму оперативного управління топологією БСМ. Результатами роботи програми є: вигреш (у відсотках) в пропускій спроможності отриманої топології мережі $S(CV^k)$ в порівнянні з початковою топологією $S(CV^0)$; відхилення від оптимального рішення, отриманого повним перебором для слабозв'язних топологій; час пошуку CV^k . Результати досліджень ефективності алгоритму оперативного управління топологією БСМ показали, що його використання дозволяє збільшити пропускну спроможність мережі в 1.5..2 рази (в порівнянні з відсутністю управління топологією). Рішення, отримане централізованим алгоритмом (центром управління мережею), на 15-20% ефективніше розподіленого. Використання бази знань дозволяє отримувати рішення в режимі реального часу (долі та одиниці секунд) та відхилення від оптимальних рішень не перевищили 6%.

Таким чином, для ефективного управління БСМ із самоорганізацією функції маршрутизації інформаційних потоків необхідно здійснювати на двох рівнях: на верхньому – управління топологією, на нижньому – управління маршрутами при заданій топології. Для верхнього рівня управління розроблено алгоритм оперативного управління топологією БСМ із самоорганізацією.

Алгоритм передбачає оцінку параметрів функціонування БСМ і, при їх зменшенні нижче допустимих значень, вироблення управляючих впливів (зміна потужностей передачі вузлів та/або направленості антен), що дозволяють здійснити користувальницьку або систему оптимізацію. Задача знаходження нової топології мережі є NP-повною. Тому для скорочення перебору запропоновані правила, об'єднані в базу знань. Використання бази знань дозволяє отримати близькі до оптимальних рішення в режимі реального часу і використовувати розроблений алгоритм для оперативного управління топологією мережі.

3.5. Методика управління топологією мережі на рівні аероплатформ чи безпілотних літальних апаратів

Як зазначалося в 3.4, забезпечення зв'язності між територіально рознесеними мобільними вузлами можливе шляхом використання ретрансляторів на базі безпілотних літальних апаратів (БЛА) (зокрема в тактичній ланці управління військами) чи на базі мережі аероплатформ (АП). Позитивний досвід використання АП (БЛА) отриманий під час збору інформації про стан навколишнього середовища, аерофотозйомки, тощо. Сьогодні українськими підприємствами проектуються та створюються окремі зразки БЛА та АП як цивільного так і військового призначення, у тому числі для створення повітряної мережі передачі даних [27].

Як і будь-який вузол БСМ із самоорганізацією, вузли на базі БЛА чи АП повинні швидко адаптуватися до частих змін топології та рівня трафіка, а також ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективної

СУ БСМ, складовою частиною якої є підсистема управління АП (БЛА). Детально класифікація задач управління АП (БЛА) (рис. 3.10) розглянута в [26].

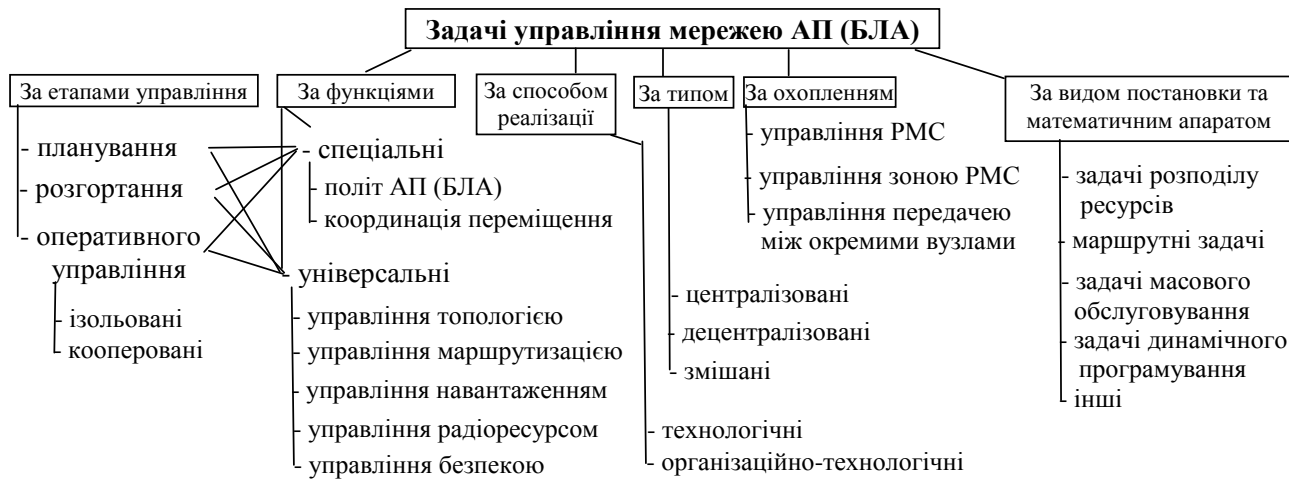


Рис.3.10– Класифікація задач управління мережею АП (БЛА)

Однією із задач управління АП чи БЛА є задача синтезу їх топології, яка реалізується відповідною підсистемою системи управління БСМ.

Залежно від основного критерію ефективності розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу топології АП (БЛА) (рис. 3.11):



Рис.3.11– Класифікація задач синтезу топології АП (БЛА)

– за критерієм мінімуму використовуваного апаратного ресурсу – знайти зв'язну топологію з мінімальною кількістю АП (БЛА) при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати кожний із критеріїв ефективності);

– за критерієм зв'язності (структурної надійності) – знайти зв'язну (v -зв'язну) топологію мережі при заданих обмеженнях;

– за критерієм часу – знайти зв'язну топологію мережі, що забезпечує мінімізацію максимальної затримки передачі повідомлень у мережі при заданих обмеженнях.

Важливою особливістю задач управління є динамічний характер АП (БЛА). Тому доцільно розглядати мережу як систему, що розвивається, – побудова мережі представляє багатоетапний процес її розвитку з деякої початкової топології в кінцеву. Звідси впливає постановка задачі динамічного програмування: задана загальна кількість АП (БЛА) для виконання завдання забезпечення зв'язності деякої БСМ. Потрібно розподілити їх за етапами (число в загальному випадку невідомо) таким чином, щоб забезпечити оптимум прийнятого критерію ефективності.

Показниками оцінки ефективності результату процесу управління АП (БЛА) можуть виступати ступінь досягнення й час виконання i -ї задачі (мети) управління.

Необхідно відзначити, що синтез топології мереж великої розмірності наштовхується на ряд труднощів, пов'язаних з великою розмірністю БСМ, багатоекстремальністю розв'язуваної задачі та недовершеністю існуючих методів оптимізації. Перелічені труднощі викликають необхідність використання декомпозиційного підходу: загальна задача синтезу топології розбивається на ряд під задач за певними пріоритетами критеріїв ефективності. Зазначені часткові задачі синтезу не є незалежними. Для цього на етапі проектування мережі будується граф у вигляді мережі цілей, вершини якого позначені цілями, а дуги відображають вплив досягнення підцілі (часткові задачі управління) у ціль (основна задача) [25].

Рішення перелічених часткових задач, у сукупності складає загальну задачу синтезу, та здійснюється, як правило, з використанням наближених евристичних методів.

Розглянемо часткову задачу синтезу топології АП (БЛА) за критерієм зв'язності (здатність будь-якої пари вузлів здійснювати інформаційний обмін, використовуючи проміжні вузли як ретранслятори). Зв'язність виступає як

основний критерій БСМ. Тому, першочерговою метою управління топологією АП (БЛА) є забезпечення зв'язності всіх (певних зон) БСМ або пріоритетних абонентів.

Введемо позначення: множина мобільних базових станцій (МБС) $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b\}$, $i = \overline{1, I}$ і їхнє положення на місцевості $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x\}$; множина кластерів $\Psi = \{ \Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_j, \dots, \Psi_J \}$, $j = \overline{1, J}$ і q_j – кількість МА (вузлів) в кожному кластері (кластер – окремий підграф мережі МБС, у якому фіксована підмножина МБС B_q^j зв'язана між собою за допомогою наявних маршрутів передачі й не пов'язані з іншими МБС); $h = \text{const}$ – висота польоту АП (будемо вважати, що всі МБС перебувають на однаковій висоті); r_u, r_b, R – максимальні дальності радіозв'язку між АП-АП, МБС-МБС і АП-МБС, відповідно (у припущенні граничної моделі радіоканалу), $r_u > r_b$; $r_z = \sqrt{R^2 - h^2}$ – максимальний радіус зони покриття АП чи БЛА; множина АП (БЛА) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u\}$, $k = \overline{1, K}$ і проекція їхнього положення на місцевості $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_k\}$.

Постановка задачі: *забезпечити зв'язну топологію БСМ мінімальною кількістю АП (БЛА)*. Тобто необхідно знайти мінімальну кількість АП (БЛА) й розташування їхніх проекцій на місцевості (центрів зон з радіусом r_z), за умови, що хоча б одна МБС кожного кластера належить зоні покриття АП (БЛА) (рис. 3.12).

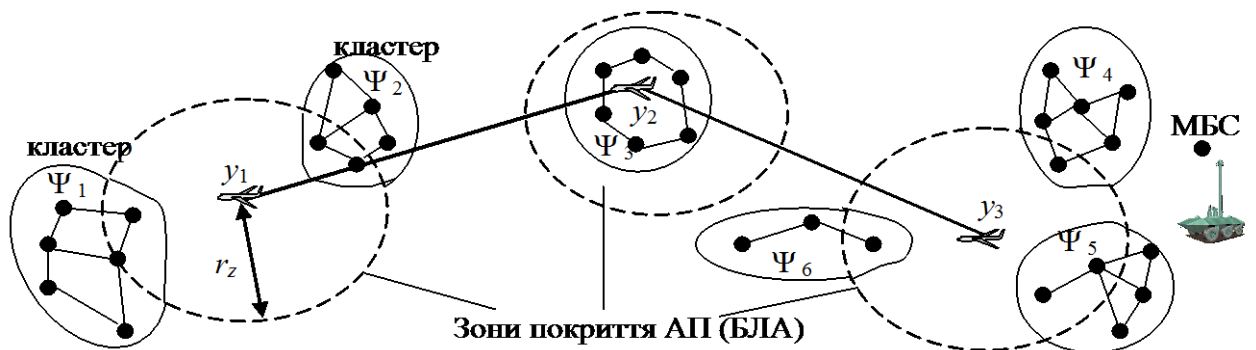


Рис.3.12– Шість кластерів покриті трьома АП (БЛА)

Математична постановка задачі формулюється в такий спосіб

$$\min K, \quad (3.15)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in \Psi_j} |x - y_k| \leq r_z, \quad k = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3.16)$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, \quad k, v \in U \quad k \neq v, \quad (3.17)$$

де $|x - y|$ – Евклідова відстань між крапками x та y на місцевості.

Нерівність (3.16) – максимальна відстань між центром зони покриття та кластерами повинна бути мінімізована. Нерівність (3.17) визначає необхідність підтримки зв'язності (мінімальної відстані r_u) між АП (БЛА).

Ця задача відноситься до класу обчислювальної геометрії та близька до задачі розміщення p -центрів відповідного графа – знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса і їхнього положення, що покривають задану кількість крапок. Задача є NP -повною. Тому одержання точного рішення для мереж великої розмірності є складним завданням і для його вирішення необхідно використовувати евристичні методи. Загальний алгоритм пошуку p -центрів описаний в [24].

Однак, на відміну від задачі пошуку p -центрів наша задача ускладнюється зняттям обмеження на розташування p -центрів у вершинах (ребрах) графа, і необхідністю забезпечення зв'язності між АП (БЛА).

Загальний алгоритм знаходження топології АП (БЛА) полягає в наступному:

1. Одержання початкового рішення (початкової топології).
2. Знаходження „центрів мас” кожного кластера $\Psi_j^0, j = \overline{1, J}$.
3. Знаходження центра зони покриття, як центра покриття центрів мас Ψ_j^0 .
4. Пошук нового рішення, що задовольняє виразам (3.15) і (3.16).
5. Аналіз отриманого рішення. Якщо поліпшення рішення можливе, то перехід до кроку 2, інакше – КІНЕЦЬ.

Число ітерацій алгоритму сильно залежить від варіанта початкового рішення. Розглянемо ще кілька постановок задач синтезу топології БСМ.

Постановка задачі: *знайти зв'язну топологію БСМ, яка мінімізує (обмежує) довжину маршрутів передачі між виділеними МБС.*

Математична постановка

$$\min L(b_j, b_t) \text{ або } L(b_j, b_t) \leq L_{\max},$$

при виконанні обмежень

$$|x_i - y_k| \leq r_z, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J},$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, k, v \in U, k \neq v,$$

де i – виділений вузол, $L(b_j, b_t)$ – довжина маршруту між j -ою МБС і t -ою МБС, у тому числі й через АП (БЛА).

Постановка задачі: *знайти зв'язну топологію БСМ, що забезпечує максимальну продуктивність БСМ.*

Очевидно, що ця задача є загальною та для її рішення вона повинна бути декомпована та погоджена за рядом підзадач, конкретний перелік яких і математична постановка визначається ситуацією на мережі, наявністю ресурсів і типом вихідних даних. Тобто рішення загальної задачі буде представляти цільову ієрархію послідовності часткових задач управління [27], кожна з яких повинна враховувати:

- параметри всієї БСМ із саморганізацією (надійності, безпеки й ін.), параметри кожного рівня БСМ (пропускні спроможності радіоканалів всіх рівнів, розмірності мереж, гранична кількість абонентів на кожному МБС, навантаження й т.д.)

- наявні ресурси кожного рівня БСМ (апаратний ресурс – кількість АП (БЛА), МБС і МА;

- математичне забезпечення управління – множина методів та алгоритмів управління інших функціональних підсистем СУ; часовий ресурс та ін.);

- вимоги щодо обслуговування абонентів (тип трафіка, навантаження та ін.).

Для вирішення задачі знаходження топології пропонується використати евристики (правила), об'єднані в базу правил (складають основний елемент системи підтримки прийняття рішень [28] центру управління БСМ). Кожне

правило залежно від цілі управління припускає реалізацію певного керуючого впливу: переміщення АП (БЛА), зміна потужності передачі або діаграми спрямованості інтелектуальної антени АП (БЛА). Правила об'єднані в групи, кожна з яких домагається досягнення певної цілі (часткової постановки задачі). Для виключення комбінаторного вибуху пропонується використати мета-правила [28], що встановлюють порядок застосування груп правил у залежності від ієрархії цілей (підцелей) управління.

Висновки до розділу

Для вивчення маршрутів передачі даних в бездротових сенсорних мережах все частіше застосовують Natural Computing - «природні обчислення». Ідея мурашиного алгоритму, який використовується в даній роботі, ґрунтується на моделюванні поведінки мурах. У природі вони мають здатність швидко знаходити найкоротший шлях від мурашника до джерела їжі і адаптуватися до умов, що змінюються, знаходячи новий найкоротший шлях.

В результаті проведених досліджень розроблений алгоритм управління передачею даних для вузла БСМ, заснований на тимчасовому поділі.

Метод семафорів пропонується використовувати для БСМ з метою обмеження доступу до деяких вузлів, в першому випадку - з заданою кількістю потоків, у другому - до вузлів, які приймають аварійну сигналізацію, яка повинна передаватися з мінімальними затримками і втратами. Для оптимізації інформаційних потоків в бездротових сенсорних мережах можна застосовувати як алгоритмічну теорію графів, так і потокові моделі.

З метою вибору критеріїв оптимізації інформаційного потоку в БСМ пропонується використовувати матрицю критеріїв, яка будується для кожного набору потоків між пікомережами. Для використання переваг, властивих мереж з кластеризацією, вибрано уявлення БСМ на основі гіперграфу [45].

Для мурашиного алгоритму пропонується два підходи по його модифікації. Перший підхід ґрунтується на алгоритмі управління передачею

даних для вузла БСМ, рис 3.3. Другий - пропонує ввести принцип семафора, рис. 3.4.

Для ефективного управління БСМ із самоорганізацією функції маршрутизації інформаційних потоків доцільно здійснювати на двох рівнях: на верхньому – управління топологією, на нижньому – управління маршрутами при заданій топології. Для верхнього рівня управління розроблено алгоритм оперативного управління топологією БСМ із самоорганізацією. Алгоритм передбачає оцінку параметрів функціонування БСМ і, при їх зменшенні нижче допустимих значень, вироблення управляючих впливів (зміна потужностей передачі вузлів та/або направленості антен), що дозволяють здійснити користувальницьку або системну оптимізацію.

У випадку, якщо БСМ побудована з використанням аероплатформ чи БЛА, для вирішення задачі знаходження топології БСМ запропоновано використання евристик (правил), об'єднаних в базу правил. Кожне правило, залежно від цілі управління, припускає реалізацію певного керуючого впливу: переміщення АП (БЛА), зміна потужності передачі або діаграми спрямованості інтелектуальної антени АП (БЛА). Правила об'єднані в групи, кожна з яких домагається досягнення певної цілі (часткової постановки задачі). Для виключення комбінаторного вибуху пропонується використати мета-правила, що встановлюють порядок застосування груп правил у залежності від ієрархії цілей (підцелей) управління.

4. Моделювання інтелектуальної БСМ

Для моделювання інтелектуальної бездротової сенсорної мережі добре підходить агентно орієнтоване моделювання. Згідно з визначенням [52], Агентне моделювання можна визначити, як окремий випадок імітаційного моделювання, в якому основна увага приділяється вивченню стану глобальної системи в залежності від поведінки агентів, які є компонентами системи [52]. У випадку сенсорних мереж спостерігається аналогічний підхід, оскільки вузли мережі розподілені по території, активно взаємодіють з навколишнім середовищем (збір параметрів навколишнього середовища є основним завданням сенсорної мережі) і сусідніми вузлами, а також поведінка і технічні характеристики окремого вузла сенсорної мережі впливають на продуктивність всієї сенсорної мережі. У разі традиційного імітаційного моделювання, модельована система розглядається як лінійна сукупність пасивних елементів в загальному процесі, і поведінка елементів заздалегідь встановлено. При дискретно-подієвому підході увага приділяється конкретного процесу, який вже розглядається нелінійно, аналізуються стадії конкретного процесу.

У разі агентного кожен компонент мережі має власний сценарій поведінки, який впливає на якість виконання поставленого завдання. Таким чином, Агентне моделювання є зручним підходом для опису систем, що складаються компонентів, чия поведінка неоднозначно і залежить від багатьох факторів.

Для виконання моделювання, за допомогою якого буде розроблена модель і протестований метод інтелектуального управління БСМ, будемо використовувати програмне забезпечення Matlab.

Matlab - високорівнева мова програмування і однойменне середовище для моделювання, а також для наукових і інженерних розрахунків, в основі якої лежить інтерпретатор власної мови Matlab. Алгоритми, що виконуються в Matlab, здебільшого, використовують вектори і матриці для обробки великих масивів даних.

Привабливість середовища для вирішення завдань поточної задачі полягає в наявності інструментів і toolboxes і візуального редактора моделювання. Matlab дозволяє вирішувати широкий спектр завдань від обробки великих масивів даних, мереж, алгоритмів автоматичного управління. Можливість обробки великих масивів даних дозволить оцінити розроблений метод на великій кількості вузлів.

Таким чином, можна виділити наступні переваги Matlab в порівнянні з іншими середовищами моделювання:

- наявність інструменту для роботи з нейронними мережами, які обрані в якості методу автоматичного управління;
- наявність інструменту для роботи з великими обсягами даних;
- наявність інструментів для візуалізації сенсорної мережі;
- наявність інструментів для роботи зі статистикою, графіками.

Вузол сенсорної мережі є відокремленим класом і характеризується індивідуальними параметрами, залежними і незалежними від стану навколишнього середовища. У разі моделювання сенсорної мережі цими параметрами є технічні характеристики вузла мережі. Параметрами, які залежать від стану навколишнього середовища, можна вважати тип, пам'ять, рівень заряду акумулятора вузла та інші. Параметрами, незалежними від стану навколишнього середовища, можна вважати відстань між вузлами, (оскільки воно фіксоване), значення ймовірностей, необхідні для розрахунку формул і інші.

Навколишнє середовище є відокремленим класом і характеризується індивідуальними параметрами, такими як розмір даної області, параметр, який вимірюється датчиками (наприклад, температура, вологість, пересування об'єктів по площі заданого розміру).

Запропонований в даній магістерській роботі метод інтелектуального управління має наступні переваги:

- інтелектуальне управління вузлом;

- можливість самостійного навчання мережі;
- виявлення невідомих закономірностей шляхом узагальнення;
- адаптація під різні вхідні дані;
- швидкодію (розпаралелювання обробки інформації за рахунок одночасної перевірки всіх параметрів вузла: вибір стану вузла проводиться після 1 перевірки параметрів, замість 5 перевірок в разі використання протоколу LEACH);
- висока відмовостійкість при апаратній реалізації.

У розроблюваній моделі БСМ вузол розглядається, як самостійний інтелектуальний об'єкт, який змінює свій стан в залежності від змін параметрів самого вузла або параметрів навколишнього середовища.

Сценарієм поведінки є послідовність дій вузла сенсорної мережі, яка змінюється в залежності від стану навколишнього середовища.

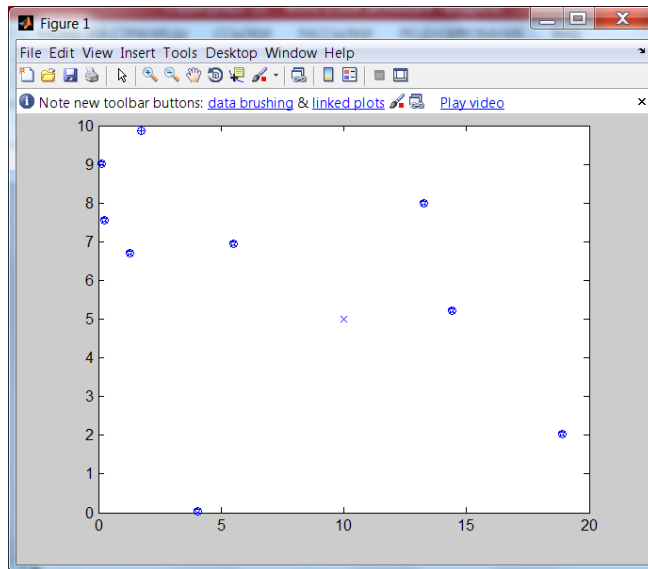
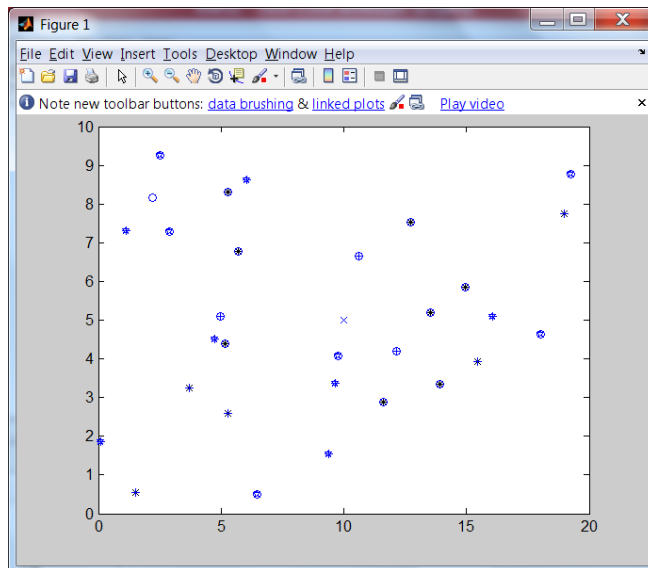
4.1 Результати експерименту

Порівняння запропонованого алгоритму керування БСМ проводиться з протоколом LEACH.

У процесі дослідження розробленої моделі планується змінювати наступні вхідні параметри для того, щоб виявити витрачання енергії мережею:

- щільність вузлів;
- кількість вузлів:

Наприклад, розташування і щільність вузлів може варіюватися від 9 вузлів рис. 4.1 до 40 вузлів і щільності їх розташування рис. 4.2.

Рис. 4.1 Розташування вузлів сенсорної мережі для $n = 9$ Рис. 4.2 Розташування вузлів сенсорної мережі для $n = 9$

Метод 1 – запропонований в роботі інтелектуальний метод управління БСМ з мобільними сенсорами, метод 2 - метод управління БСМ на основі протоколу LEACH.

Таблиця 4.1 Результати дослідження

Кількість вузлів		9	15	20	25	30	40	45
Метод 1	Залишок енергії, Дж	29,46	46,08	62,08	79,42	98,9	130,5	148,8
	«Мертві»	0	0	0	0	0	0	0

	вузли							
Метод 2	Залишок енергії, Дж	9,204	15,94	20,65	26	30,62	41,08	46,61
	«Мертві» вузли	0	0	0	0	0	0	0

Виходячи з отриманих результатів в таблиці 4.1, можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості вузлів сенсорної мережі зростає кількість енергії на вузлах сенсорної мережі, яка залишається після закінчення заявленої кількості циклів роботи. Тобто, з точки зору енергоефективності, вигідно підвищувати щільність розташування вузлів сенсорної мережі.

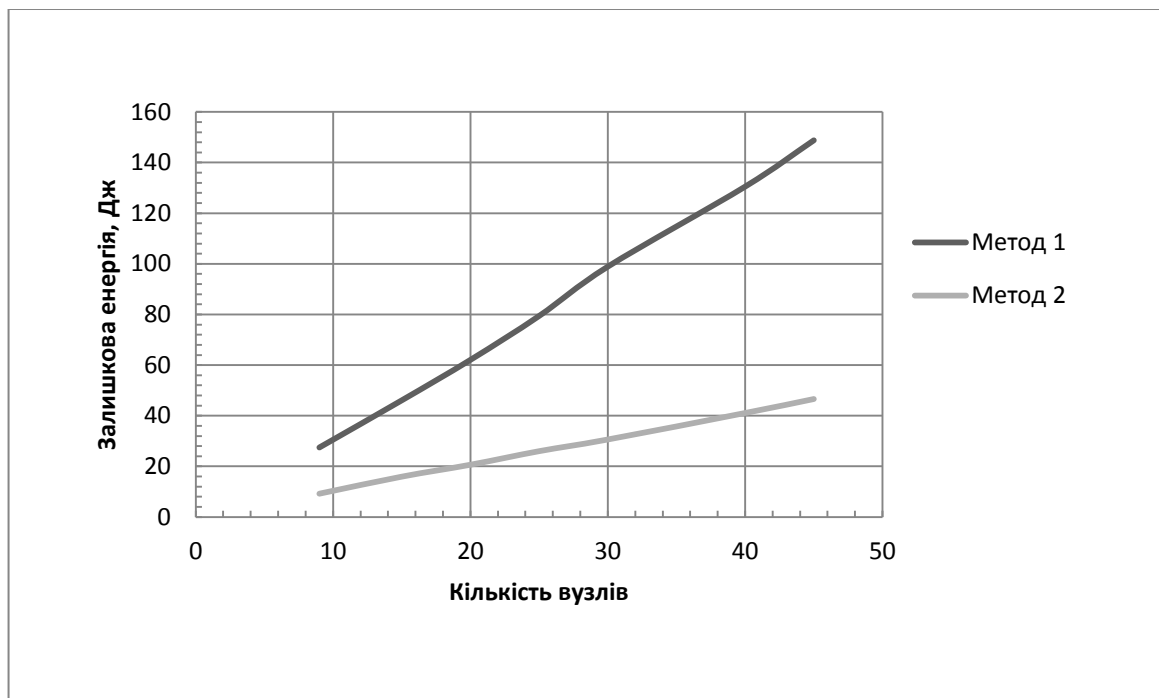


Рис. 4.3 - Графік залежності енергоспоживання мережі від щільності розташування вузлів для Методу 1, Методу 2

Таблиця 4.2 Дані для дослідження залежності енергії від площі спостереження

Кількість вузлів	30000							
Розмір поверхні, км	5x5	5x10	10x10	10x20	10x30	20x20	20x30	30x40
Площа, км ²	25	50	100	200	300	400	600	1200
Кількість циклів	50							

Результати дозволяють зробити висновок про те, що площа поверхні від 50 до 150 км². При подальшому збільшенні щільність вузлів зменшується і енергоспоживання зростає. Про це свідчить зростаючий графік до значення 150 км² і регресію після цієї межі.

Таким чином, з точки зору енергоефективності, для розподілу 30000 вузлів вигідно вибирати розмір поверхні площа якої від 50 до 150 км².

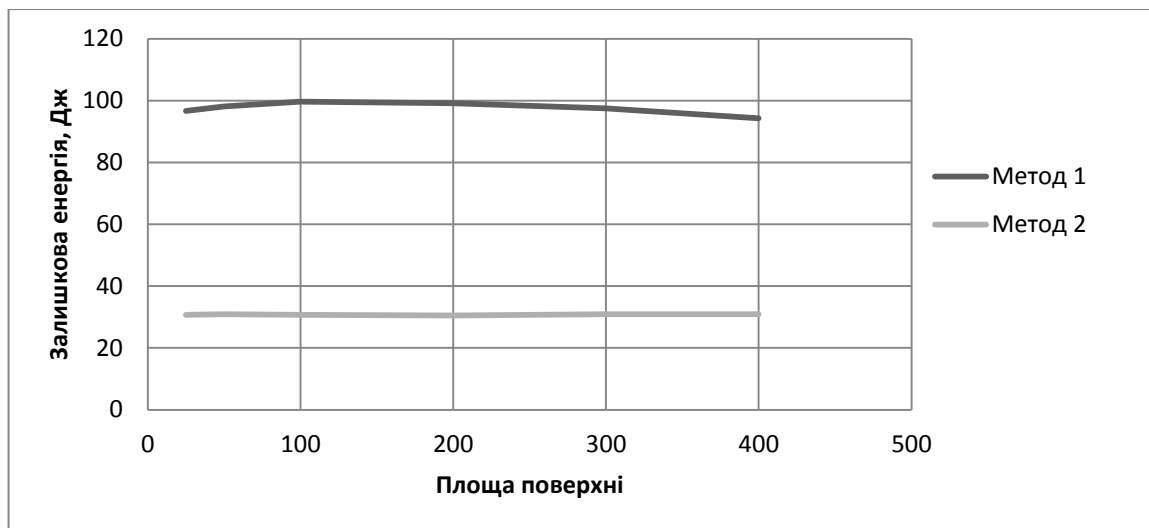


Рис 4.4. Графік залежності енергоспоживання мережі від площі поверхні для Методу 1, Методу 2

4.2 Моделювання мурашиного алгоритму

Енергоспоживання кожного вузла є число його синів у дереві ЗД, тобто величина, однозначно визначається деревом, то при складанні розкладу передачі даних по наявному дереву, оптимізація здійснюється за часом ЗД. Мінімізація часу досягається за допомогою мурашиного алгоритму, суть якого полягає в ЗД на кожному кроці (ЧІ) з максимально можливого числа вузлів. Такий алгоритм дій оптимальний, так як кожен вузол, перш ніж передати дані, повинен здійснити прийом даних від усіх своїх синів по дереву збору, а, отже, черговість, у якій відбувається прийом даних від синів, не має значення.

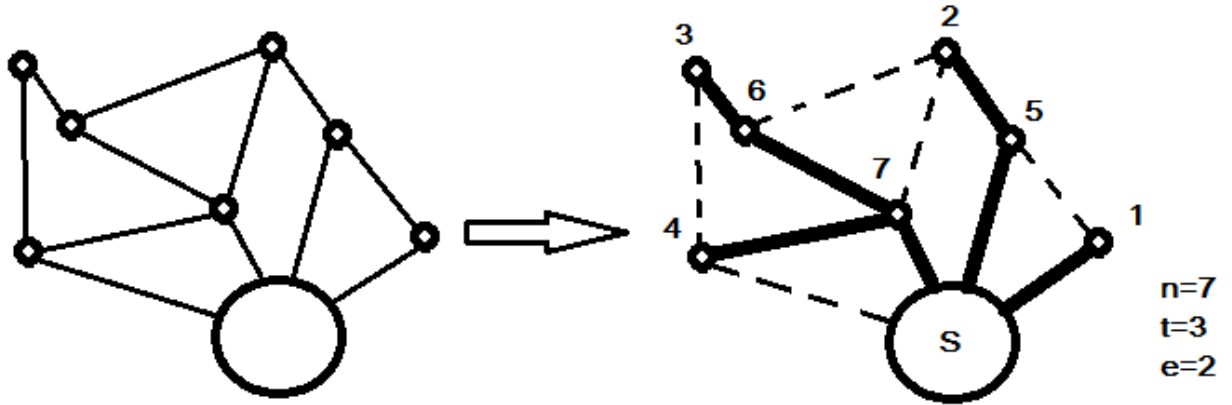


Рис. 4.5. Граф БСМ

Рис. 4.6 Оптимальне дерево збору даних для БСМ з рис. 4.5

Розглянемо БСМ, показану на рисунку 4.5, і відповідне їй дерево ЗД (рис.4.6), де пунктирними лініями позначені ребра графа БСМ, що не ввійшли в дерево ЗД. На обох рисунках позначення "S" відповідає центральному вузлу. На першому кроці вузли 1-4 передають дані вузлам S,5,6 та 7 відповідно. Другим кроком є передача даних вузлами 5 та 6 вузлам S та 7 відповідно. На останньому - третьому етапі, вузол 7 передає дані в центральний вузол, на цьому цикл ЗД завершено. Таким чином, час ЗД в даному прикладі складає 3 часових одиниць, в той час як критичне енергоспоживання рівно 2.

Виходячи з вище наведених тверджень, впливає факт про співставлення критичного енергоспоживання до часу циклу ЗД. Таким чином при економії енергії шляхом зменшення кількості синів у дереві збору даних збільшиться кількість ЧІ, що необхідна для доставки даних з усіх вузлів мережі. Для мінімальної тривалості циклу збору даних, тобто при використанні моделі при необмеженому критичному енергоспоживанні, час складатиме:

$$L = \log_2(n + 1) \quad (4.1)$$

Або

$$n = 2^L - 1 \quad (4.2)$$

Аналогічним чином можна підійти до розв'язку задачі шляхом мінімізації критичного енергоспоживання, тобто не обмежувати в часі тривалість циклу збору даних. Таким чином число синів в дереві ЗД складатиме 1, а тривалість циклу впливатиме з кількості елементів:

$$n = \sum_{i=1}^L i \quad (4.3)$$

Таким чином параметри дерева ЗД (кількість вузлів, тривалість циклу та критичне енергоспоживання) знаходяться на площині між двома функціями мінімального та необмеженого критичного енергоспоживання. Виходячи з кількості вузлів та обмежень закладених в мережу можна вибрати відповідну модель ідеального дерева ЗД рис. 4.7

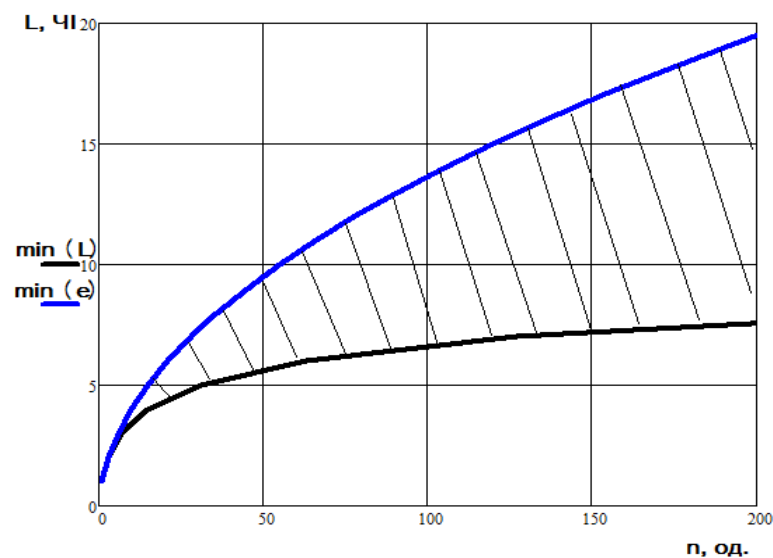


Рис. 4.7 Площина ЗД

Для прикладу на графіку покажемо випадок для критичного енергоспоживання $e=2$, а також інші можливі випадки для $n < 1023$. Число 1023 зумовлене кількістю вузлів для необмеженого енергоспоживання та тривалості циклу ЗД рівне 8 од. та ЧІ відповідно. Графік зроблений за допомогою програми Mathcad і зображено на рис.4.8:

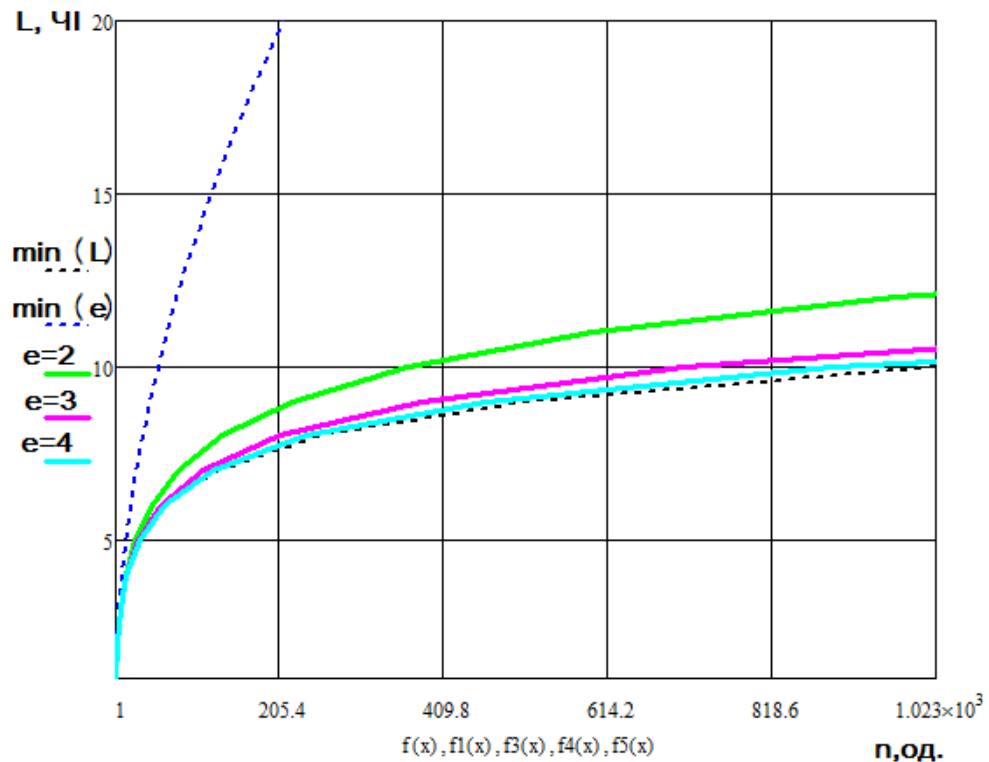


Рис. 4.8 Кількісні показники для різних критичних енергоспоживань

Графіки є відображенням формули для розрахунку максимальної кількості вузлів яку можна реалізувати при заданих значеннях тривалості циклу ЗД та показника критичного енергоспоживання. Словесно закон побудови дерева ЗД можна звести до твердження: кожна наступна гілка дерева є сумою 'e' попередніх.

Для чисельного порівняння представимо отримані дані, які підраховали за допомогою програми Mathcad у вигляді таблиці.

Таблиця 4.1 Залежність максимальної к-сті вузлів від заданих показників

	e=1	e=2	e=3	e=4	e=5	e=6	e=7	e=8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	3	3	3	3	3	3	3	3
3	6	7	7	7	7	7	7	7
4	10	14	15	15	15	15	15	15
5	15	26	30	31	31	31	31	31
6	21	46	58	62	63	63	63	63
7	28	79	110	122	126	127	127	127
8	36	133	206	238	250	254	255	255
9	45	221	383	462	494	506	510	511
10	55	364	709	894	974	1.006*10 ³	1.018*10 ³	1.023*10 ³
11	66	596	1.309*10 ³	1.727*10 ³	1.918*10 ³	1.998*10 ³	2.03*10 ³	2.047*10 ³
12	78	972	2.413*10 ³	3.333*10 ³	3.774*10 ³	3.966*10 ³	4.046*10 ³	4.095*10 ³
13	91	1,581*10 ³	4.444*10 ³	6.429*10 ³	7.423*10 ³	7.87*10 ³	8.062*10 ³	8.191*10 ³
14	105	2.567*10 ³	8.18*10 ³	1.24*10 ⁴	1.46*10 ⁴	1.561*10 ⁴	1.606*10 ⁴	1.638*10 ⁴
15	120	4.163*10 ³	1.505*10 ⁴	2.39*10 ⁴	2.87*10 ⁴	3.098*10 ⁴	3.2*10 ⁴	3.277*10 ⁴
16	136	6.746*10 ³	2.769*10 ⁴	4.608*10 ⁴	5.643*10 ⁴	6.144*10 ⁴	6.374*10 ⁴	6.553*10 ⁴
17	153	1.093*10 ⁴	5.094*10 ⁴	8.882*10 ⁴	1.109*10 ⁵	1.219*10 ⁵	1.27*10 ⁵	1.311*10 ⁵
18	171	1.769*10 ⁴	9.37*10 ⁴	1.712*10 ⁵	2.181*10 ⁵	2.418*10 ⁵	2.529*10 ⁵	2.621*10 ⁵

8	1	4	4	5	5	5	5	5
1	19	$2.864 \cdot 10$	$1.724 \cdot 10$	$3.3 \cdot 10^5$	$4.288 \cdot 10$	$4.796 \cdot 10$	$5.038 \cdot 10$	$5.243 \cdot 10$
9	0	4	5		5	5	5	5
2	21	$4.635 \cdot 10$	$3.17 \cdot 10^$	$6.362 \cdot 10$	$8.43 \cdot 10^$	$9.513 \cdot 10$	$1.004 \cdot 10$	$1.049 \cdot 10$
0	0	4	5	5	5	5	6	6

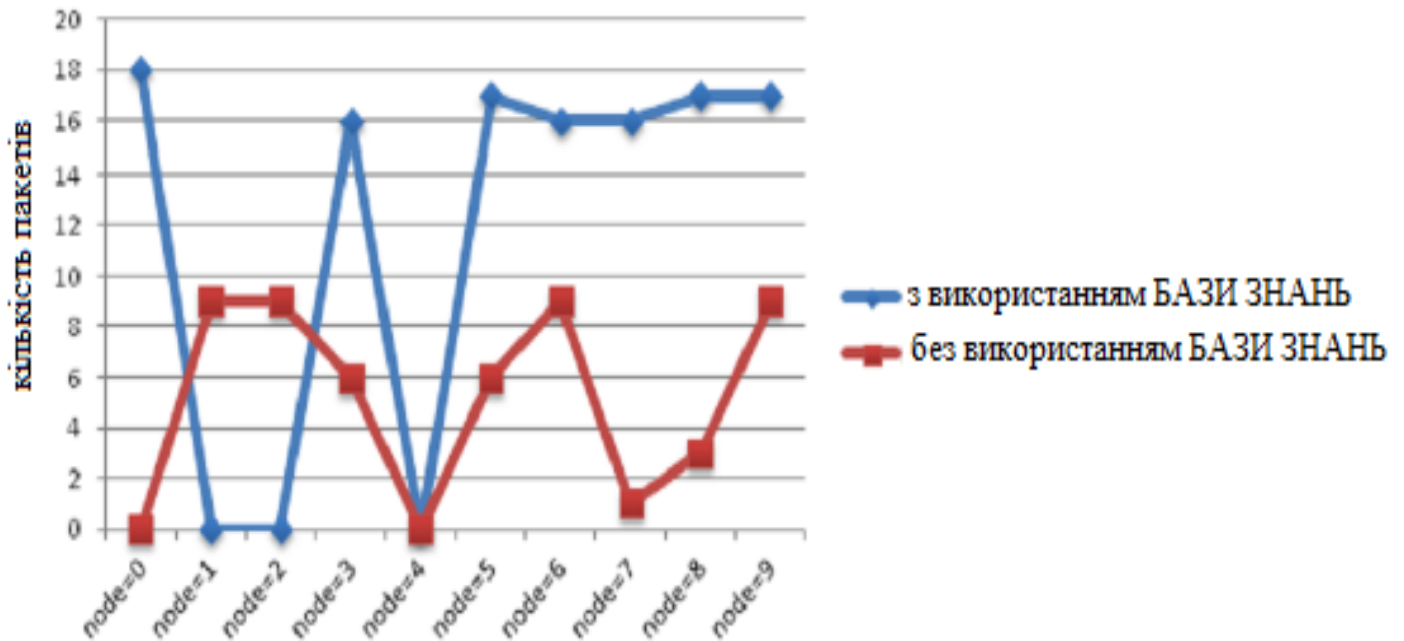


Рис. 4.9. Програмна реалізація інтелектуального методу управління БСММС з використанням бази знань

Висновки до розділу

У цьому розділі була реалізована імітаційна модель бездротової сенсорної мережі. Була розглянута система імітаційного моделювання Matlab, її переваги і недоліки. Для моделювання розглянутих мереж була обрана система Matlab. За допомогою реалізованої імітаційної моделі були отримані параметри якості передачі даних для мережі, які порівнювались з алгоритмом керування БСМ, що використовує протокол LEACH. За результатами моделювання зроблено висновок, що розроблений алгоритм має вигреш у енергоефективності в порівнянні з протоколом LEACH.

Загальні висновки

Сенсорні системи нині інтенсивно розвиваються, удосконалюються і є важливою складовою частиною інформаційного суспільства, забезпечуючи моніторинг різних промислових, природних, соціальних та інших процесів. Сфери використання сенсорних систем охоплюють різні галузі народного господарства, медицину, правоохоронні, контрольні й охоронні структури, зокрема і структури Міністерства з надзвичайних ситуацій, протипожежні, контролю навколишнього середовища, контролю за станом адміністративних, житлових і господарських споруд. Телекомунікаційні сенсорні мережі є матеріальною основою інформаційних сенсорних систем.

Сучасні телекомунікаційні сенсорні мережі доцільно будувати за технологіями сучасних мереж наступного покоління NGN, забезпечуючи передачу різних видів інформації: даних про стан того або іншого об'єкта чи групи об'єктів, що містять інформацію про різні параметри об'єкта моніторингу; мовні сигнали в цифровій формі, призначені для обміну мовною інформацією між персоналом центру обробки даних або пультів і персоналом на об'єктах моніторингу; мультимедійну інформацію з можливістю передачі як статичних, так і динамічних зображень. До специфічних особливостей СТС належать підвищені вимоги до оперативності розгортання і мобільності, наявність властивостей самоорганізації, надійності мереж, достовірності передачі даних про стан об'єктів моніторингу, оскільки втрати критичної інформації, що надходить від сенсора, можуть мати надзвичайно високу ціну, особливо в охоронних системах контролю режимів енергетичних і виробничих процесів, при виникненні пожежі тощо.

Проведені в рамках дипломної роботи дослідження утворюють теоретичну і практичну основу для проектування оптимальної топології інтелектуальної БСМ з мобільними сенсорами, а також прогнозування тривалості життя як окремих вузлів так і мережі в цілому.

Мета роботи досягнута: : оптимізовано відправку пакетів і управління потоком даних та зменшено енергоспоживання для сенсорних вузлів на 23 – 33% у безпроводних сенсорних мережах з мобільними сенсорами (БСММС).

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз енергоспоживання вузлів безпроводної сенсорної мережі.
2. Запропоновано кластеризацію як один з методів зменшення споживання енергії вузлами БСМ], а також одним з кращих варіантів зменшення інформаційного потоку.
3. Проведено удосконалення мурашинного алгоритму управління інформаційними потоками шляхом введення принципу семафора з трьома станами, що дозволяє в будь-який момент передати найбільш важливу інформацію.
4. Розроблено методику управління топологією інтелектуальних безпроводних сенсорних мереж із мобільними сенсорами для оптимізації відправки пакетів та управління потоком даних у БСММС.
5. Проведено комп'ютерне моделювання розроблених методів управління інтелектуальними БСМ.

Перелік посилань

1. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети / В. Столингс. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2010.
2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. — М.: Эко-Трендз, 2011. — 384 с.
3. Сучасні телекомунікаційні мережі у цивільному захисті / [Щербак Г.В., Мельнікова Л.І., Рубан І.В., Садовий К.В., Сумцов Д.В.]: Підручник. — Харків: 2009. — 255 с.
4. Алгулиев Р. М. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / Р.М. Алгулиев, Т.Х. Фаталиев, Б.С. Агаев, Т.С. Алиев // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. — 2013. — № 4. — С. 27—32.
5. Горяева С.М. Застосування сенсорних мереж зв'язку для дистанційного контролю психічного стану рятувальника / С.М. Горяева, Г.В. Щербак // Проблеми екстремальної та кризової психології. Збірник наукових праць. Вип. 3.Ч.1. — Х.: УЦЗУ, — 2012. — С. 122—126.
6. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи / Шахнович И. В. — М.: Техносфера, 2012. — 288 с. — (Издание второе, исправленное и дополненное.)
7. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / [Алгулиев Р.М., Фаталиев Т.Х., Агаев Б.С., Алиев Т.С.] // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. — 2010. — №4. — С. 27—32.
8. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и беспроводных сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // Электросвязь. — 2010. № 6.
9. Миночкин А.И. Управление топологией мобильных радиосетях / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок . — № 2. — 2013.

10. Ільченко М.Ю. Телекомунікаційні системи на базі високо піднятих аероплатформ/ Ільченко М.Ю., Кравчук С.О., Антоненко Р.А. // Зв'язок. – 2013. – №3. – С. 48 – 53.
11. ITU-T G.1010. End use multimedia QoS categories, 2011.
12. Кульгін М. Технології корпоративних мереж. Енциклопедія / Кульгін М. – СПб: Издательство „Питер”, 2009. – 704с.
13. Емельянов В.А. Лекції по теорії графів / Емельянов В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И. – М.: Наука, 2008. – 384 с.
14. Цыбаков Б.С. Аналіз устійчivosti мережі з комутацією пакетів і його застосування до побудови єдиного підходу до синхронних і асинхронних радіосетей Алоха / Цыбаков Б.С., Бакиров В.Л. // Проблеми передачі інформації. – 2011. – № 2. – С. 70 – 85.
15. Бурлаков М.В. Оптимальний доступ абонентів до ресурсів супутникових каналів / Бурлаков М.В. // Зв'язок. – 2012. – № 2. – С. 39 – 43.
16. Романюк В.А. Активна маршрутизація в мобільних радіосетях / Романюк В.А. // Зв'язок. – № 3. – 2012. – С. 21 – 25.
17. Назаров А.А. Аналітичні співвідношення для розрахунку продуктивності супутникової мережі зв'язу з багатодоступом / Назаров А.А., Неволько М.П., Пичугін С.Б. // Изв. РАН. Технічна кібернетика. – 2009. – № 6. – С. 90 – 97.
18. Ротштейн А.П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / Ротштейн А.П. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2012. – 320 с.
19. Rossides L. Fuzzy RED: Congestion Control for TCP/IP Diff-Serv / [L. Rossides, A. Sekercioglu, A. Pitsillides, A. Vasilakos, S. Kohler, P. Tran-Gia] // Advances in Computational Intelligence and Learning 2012, P. 343 – 352.
20. Поспелов Д.А. Ситуаційне управління. Теорія і практика / Поспелов Д.А. – М.: Наука, 2011. – 284 с.

21. Alandjani G. Fuzzy routing in ad-hoc networks / Alandjani G., Johnson E. // IEEE Proc. Conf. Performance, Computing and communications. – April, 2013. – P. 525 – 530.
22. Бунин С.Г. Сети связи на основе одночастотных дуплексных ретрансляторов: тезисы 15-й Межд. Крымской конф. [„СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”] / Бунин С.Г., Войтер А.П., Корж Ю.В. // – Севастополь. – 2011. – С.63 – 64.
23. Бунин С.Г. Ретрансляция в радиосетях Ad hoc / Бунин С.Г., Войтер А.П. // Зв’язок. – 2012. – №6. – С.40 – 42.
24. Назаров А.А. Общий подход к исследованию марковских моделей сетей передачи данных, управляемых статистическими протоколами случайного множественного доступа / Назаров А.А., Цой С.А. // Автоматика и вычислительная техника. – 2014. – № 4. – С. 73 – 85.
25. Советов Б.Я. Построение сетей интегрального обслуживания / Советов Б.Я., Яковлев С.А. – Л.: Машиностроение, 2010. – 332 с.
26. Романюк В.А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях / Романюк В.А. // Зв’язок. – 2011. – № 6. – С. 36 – 41.
27. Кузнецов Д.Ю. Исследование сетей связи с адаптивными протоколами случайного множественного доступа в условиях большой загрузки для бесконечного числа станций / Кузнецов Д.Ю., Назаров А.А. // Автоматика и вычислительная техника. – 2013. – № 3. – С. 14 – 19.
28. Freebersyser J. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks / Freebersyser J., Leiner B. // Ad Hoc Networking, Addison Wesley. – 2014. – P. 154 –160.
29. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Інтелектуальний метод маршрутизації в мобільних радіомережах (MANET). Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. – Випуск № 1. – Київ: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2009, с.74-87

30. Баскаков С. С. Исследование способов повышения эффективности маршрутизации по виртуальным координатам в беспроводных сенсорных сетях // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. № 2. С. 112–124.
31. Комаров М. М., Восков Л. С. Позиционирование датчиков беспроводной сети как способ энергосбережения // Датчики и системы. 2012. Т. 1. С. 34–38.
32. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 4-е издание, 2010. 943 с.
33. Chen Y., Nasser N. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks // Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks. QShine '06. New York, NY, USA: ACM, 2014.
34. Dario I. A., Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges // Ad Hoc Networks. 2015. Vol. 3. P. 257–279.
35. Goyal M., Rohm D., Hosseini H. et al. A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation // Proceedings of the 12th international conference on Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009. P. 199–207.
36. Pu F., Li C., Gao T. et al. Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Health Monitoring // Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on. 2010. P. 1–4.
37. Soro S., Heinzelman W. B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'15). IPDPS '15. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2015. P. 236–243.

38. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks // IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst. 2009. Vol. 20, no. 10. P. 1526–1539.
39. The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything [Электронный ресурс]. URL: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
40. IEEE 802.15.4d-2009 standard [Электронный ресурс] / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2009. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf>
41. ZigBee specification overview [Электронный ресурс] / ZigBee Alliance. 2012. URL: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx>
42. Energy Harvesting Wireless Technology [Электронный ресурс] / EnOcean GmbH. 2012. URL: <http://www.enocean.com/en/energy-harvesting-wireless>
43. Термогенератор Micropelt [Электронный ресурс]. URL: <http://www.micropelt.com/products/thermogenerator.php>
44. Ha, I. An Energy-Efficient Data Collection Method for Wireless Multimedia Sensor Network [Text] / I. Ha, M. Djuraev, B. Ahn // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–8. doi: 10.1155/2014/698452
45. Rehman, R. A. L2ER: Low-Latency and Energy-Based Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks [Text] / R. A. Rehman, B.-S. Kim // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–9. doi: 10.1155/2014/963202
46. Zou, P. Low energy WSN data aggregation algorithm based on improved aggregation tree model [Text] / P. Zou, Y. Liu // International Journal of Sensor Networks. – 2014. – Vol. 15, Issue 3. – P. 149–156. doi: 10.1504/ijsnnet.2014.063895
47. Xiao P. A new trusted roaming protocol in wireless mesh networks [Text] / P. Xiao, J. He, Y. Chen, Y. Fu // International Journal of Sensor Networks. – 2013. – Vol. 14, Issue 2. – P. 109–119. doi: 10.1504/IJSNET.2013.056610

48. Moon, S.-H. Energy-efficient flow control and routing for clustered wireless sensor networks [Text] / S.-H. Moon, S.-J. Han, S. Park // The International Conference on Information Networking (ICOIN), 2013. – P. 83–88. doi: 10.1109/icoin.2013.6496356
49. Галкин, П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей [Текст] / П. В. Галкин // ScienceRise. –2014. – № 2 (2). – С. 55–61. doi: 10.15587/2313-8416.2014.27246
50. Коваленко, А. М. Разработка алгоритма направленной маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей. [Текст] / А. М. Коваленко, В. А. Дидук, Е. Г. Трофименко // Труды Одесского политехнического университета. – 2011. – Вып. 1 (35). – С. 151–154.
51. Галкин, П. В. Модель беспроводной сенсорной сети на основе гиперграфа [Текст] : сб. матер. фор. / П. В. Галкин // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Т. 4. – Харьков: ХНУРС, 2013. – С. 71–72.
52. ZigBee Green Power User Guide // NXP Semiconductors. – URL: http://www.nxp.com/documents/user_manual/JN-UG-3095.pdf
53. Шпанчук О.О., Лисенко О.І., «Підхід до аналізу споживання енергоресурсів вузлом бездротової сенсорної мережі, конференція», «Проблеми телекомунікацій-18», 380-383 с.
54. Шпанчук О.О., Прищепа Т.О., «Розвиток методів інтелектуального управління безпроводовими сенсорними мережами з мобільними сенсорами», «Проблеми телекомунікацій-17», 377-380 с.