

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

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

на тему: Розвиток методів енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах

Виконав: студент _5_ курсу, групи ТЗ-71мп

(шифр групи)

Опанасець Віталій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник професор, к.т.н., Лисенко О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 рік

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОНЯТТЯ ПРО БЕЗПРОВОДОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ .8	
1.1. Огляд та загальна архітектура БСМ.....	8
1.2. Класифікація і порівняння стандартів безпроводових сенсорних мереж	10
1.3. Детальний опис стандарту IEEE 802.15.4.....	15
1.4. Загальні відомості про енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах.....	21
Висновок до розділу:.....	34
2. РОЗВИТОК СПОСОБІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.	35
2.1. Використання MAC протоколів.....	35
2.2. Використання протоколів маршрутизації для енергозбереження в БСМ.....	39
Висновки до розділу:	43
3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БСМ	44
3.1. Детальний опис і оцінка енергоефективності MAC протоколів.....	44
3.2. Детальний опис і оцінка енергоефективності кластерного протокола маршрутизації.....	55
3.3. Математичне моделювання вдосконаленого енергоефективного протоколу маршрутизації LEACH.....	60
Висновки до розділу:	84
ВИСНОВОК	86
Перелік посилань	88

Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Опанасець В.А.			Розвиток методів енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.							5	87
Реценз.								
Н. Контр.		Петрова В. М.						
Затверд.		Явіся В. С.						

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

MAC - Media Access Control

S-MAC - Sensor Media Access Control

T-MAC - Time Media Access Control

WiseMAC - Wireless Sensor Media Access Control

DEE-MAC - Dynamic Energy Efficient Media Access Control

Z-MAC – Zebra Media Access Control

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

CSMA-CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

OSI - Open Systems Interconnection Basic Reference Model

PEGASIS - Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems

LEACH - Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

APTEEN - Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient Network

TEEN - Threshold sensitive Energy Efficient Network

TDMA - Time Division Multiple Access

WSN - Wireless Sensor Network

GFSK - Gaussian Frequency Shift Keying

LLC - Logical Link Control

FFD - full-function device

RFD - reduced-function device

RAM - Random Access Memory

O-QPSK - Offset Quadrature Phase Shift Keying

БСМ - безпроводові сенсорні мережі

ДКЕ – динамічне керування електроживленням

ГКВ – головний кластерний вузол

D-LEACH – Divide Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

ВСТУП

Кожного дня розвиток та інтеграція сенсорів у побут людини набуває неймовірних об'ємів. Якщо подивитися навколо себе, то неозброєним оком можна побачити безліч сенсорів, які оточують нас, починаючи від смартфонів, великих екранів і закінчуючи маленькими сенсорними датчиками для кросівок. З часом воно все буде взаємопов'язане у певній сфері і буде зчитувати, обробляти і передавати всю інформацію між собою, в результаті чого створить безпроводову сенсорну мережу

Беспроводові сенсорні мережі (БСМ) – це самоорганізуючі, розподілені, масштабовані мережі, що складаються з безлічі автономних сенсорів (сенсорних вузлів), об'єднаних за допомогою радіоканалу. Метою мережі є моніторинг параметрів деякого зовнішнього середовища (температури, звуку, тиску, шуму, руху і т.д.) чи вплив на них або на деякий об'єкт управління.

Актуальність теми даної роботи обумовлена тим, що безпроводові сенсорні мережі все більше використовуються у різних галузях, в зв'язку з тим, що все більше й більше розвивається техніка і конструювання безпроводової мережі, коли необхідно пов'язати в мережу постійно рухомі або часто переміщуванні вузли, де не потрібно надто висока швидкість передачі даних, а потрібно можливість до самовідновлення, маленькі розміри конструкції та відносна низка вартість конструкції.

Завдання полягає в дослідженні факторів, що впливають на енергозбереження і аналізі способів енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах.

Метою роботи є дослідження способів енергозбереження за допомогою різних MAC протоколів, протоколів маршрутизації, а також вдосконалення і математичне моделювання вдосконаленого підходу зменшення енергоспоживання в БСМ.

Для досягнення даної мети в роботі вирішуються такі завдання:

- огляд всіх можливих підходів для зменшення енергоспоживання БСМ;
- дослідження різних можливих методів збільшення енергоефективності БСМ;
- дослідження та класифікація різних протоколів маршрутизації в БСМ;
- математичне модулювання модифікованого протоколу маршрутизації з кластерною архітектурою і порівняння його з вже існуючим протоколом.

Об'єктом дослідження виступають безпроводові сенсорні мережі, предметом – розвиток способів енергозбереження в БСМ.

У першому розділі здійснений огляд сучасних безпроводових сенсорних мереж, загальні відомості, застосування, стандарти за якими працюють безпроводові сенсорні мережі та виконано порівняння між собою. Також у цьому розділі було коротко відзначено всі можливі підходи, які можливо використовувати для зменшення споживання енергії.

У другому розділі наведена класифікація MAC протоколів, а також описанні їх основні відмінності. Розглянуті протоколи маршрутизації, основні вимоги до алгоритмів маршрутизації, а також здійснена класифікація протоколів.

У третьому розділі було детально розглянуто ієрархічні протоколи маршрутизації, такі як LEACH, і LEACH-C. Після чого було проведена математичне модулювання модифікованого ієрархічного протоколу маршрутизації D-LEACH і виконане порівняння його з вже існуючим LEACH протоколом.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОНЯТТЯ ПРО БЕЗПРОВОДОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

Безпроводові сенсорні мережі являють собою активно розвиваються системи автоматизації та управління, моніторингу та контролю. Взаємодіючи з керуючими пристроями, датчики створюють розподілену, самоорганізуючу систему збору, обробки і передачі інформації. Поняття «самоорганізована мережа» визначається як система, в якій пристрої «вміють» самі знаходити один одного і формувати мережу, а разі виходу з ладу будь-якого з вузлів можуть встановлювати нові маршрути для передачі повідомлень.

Технологія сенсорних мереж не вимагає для побудови мережі дорогих кабелів разом з допоміжним обладнанням (кабельними каналами, клемами, шафами і т.д.). Кожен елемент мережі має автономне джерело живлення, мікрокомп'ютер, приймально-передавальний пристрій. А так як сенсорна мережа підтримує основні інтерфейси і протоколи, які застосовуються в даний час, є можливість інтегрувати її в існуючу мережу без проведення масштабної реконструкції. Датчики безпроводових сенсорних мереж є дуже маленькими, в зв'язку з чим невелика кількість енергоспоживання, відносно невелика ціна та можливість розташування його у важкодоступні місця дає можливість для використання в тих областях, де необхідно побудувати системи контролю безпеки, керування чи в інших сферах. Область покриття мережі може бути різним, від кількох метрів до декількох кілометрів.

1.1. Огляд та загальна архітектура БСМ.

Безпроводові сенсорні мережі складаються з окремих вузлів датчика, розгорнутими в даній області, які спільно збирають і несуть дані до основного об'єкта для контролю фізичні або умови навколишнього середовища. Основний об'єкт, також позначений як базова станція або приймач, може бути підключений

до інфраструктури або до Інтернету через шлюз, який дозволяє віддаленим користувачам отримувати доступ до зібраних даних. Основна перевага безпроводових сенсорних мереж заключається в можливості розвернути багато крихітних автономних датчиків без будь-якої встановленої інфраструктури. (Рис. 1.1.). Після розгортання датчики збирають інформацію, і згідно з визначеним протоколу зв'язку, вони передають дані до базової станції способом в один «стрибок» (single-hop) або багато «стрибків» (multi-hop).

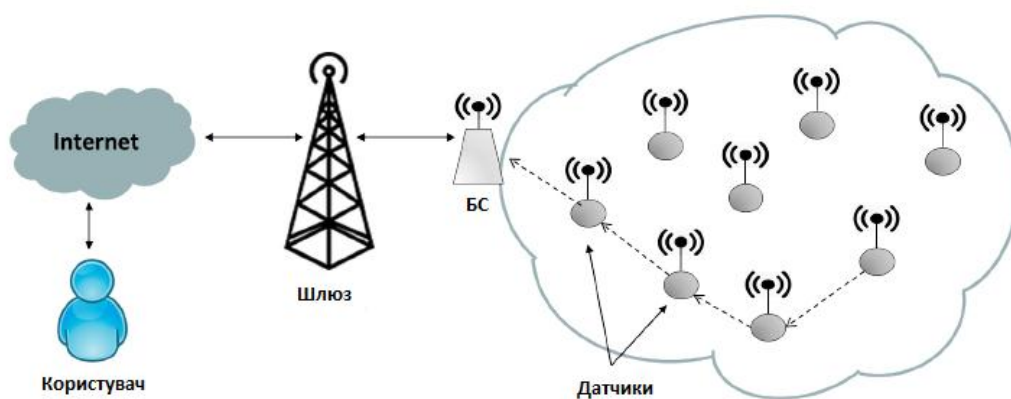


Рис. 1.1. Приклад базової архітектури БСМ

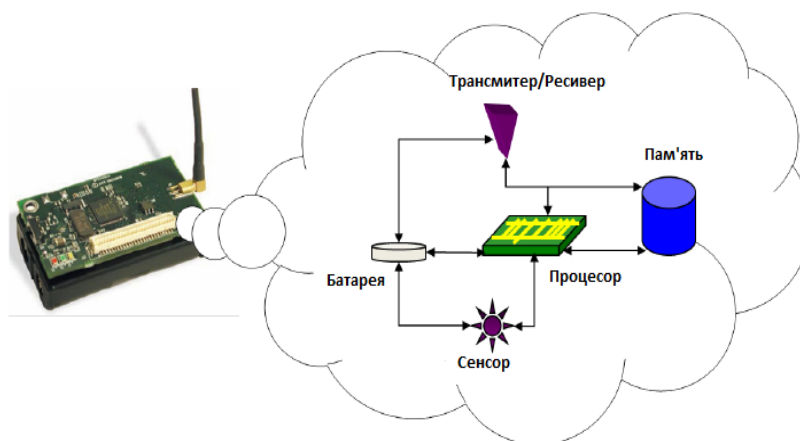


Рис. 1.2. Архітектура сенсорного датчика

На рисунку 1.2 зображено загальну архітектуру сенсорного датчика. Датчик складається з сенсора, сховища пам'яті, процесора, батареї та ресивер,

трансмiтер (радіо). Радіо використовується для передачі через безпроводові канали з іншими датчиками і базовою станцією, в той час як чутливий елемент вимірює зовнішні параметри (наприклад, температура, прискорення, рівень шуму). Датчики можуть бути обладнані додатковими елементами, такими як система локалізації (GPS), компоненти збору врожаю харчування або приводи. Вартість вузлів повинна бути підтримана на низькому рівні для зменшення загальної вартості мережі, і хороший компроміс повинен бути знайдений між сумою функцій, забезпечених датчиком і його вартістю.

Варіація зміни відстані покриття залежить від антени та типу модуля, а також здатності до ретрансляції повідомлень.

Існують такі стандарти безпроводних сенсорних мереж, як:

- стандарт Wi-Fi;
- стандарт WiMAX;
- стандарт IEEE 802.15.4;
- стандарт ZigBee;
- стандарт Bluetooth.

Багато стандартів передачі даних безпроводових сенсорних мереж працюють в 2.4ГГц частотному діапазоні, в зв'язку з чим створюють завади один одному, хоча і з'являються стандарти, що працюють в іншому частотному діапазоні. Наприклад IEEE 802.11ac працює в 5ГГц частотному діапазоні.

1.2. Класифікація і порівняння стандартів безпроводових сенсорних мереж

Різних стандартів безпроводових сенсорних мереж в даний момент часу існує дуже багато, але в загальному їх можна розділити на три групи:

- WLAN (Wireless Local Area Network – безпроводова локальна мережа);

- WPAN (Wireless Personal Area Network - безпроводова персональна мережа);
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network - безпроводова мережа масштабу міста) (Рис. 1.2.).

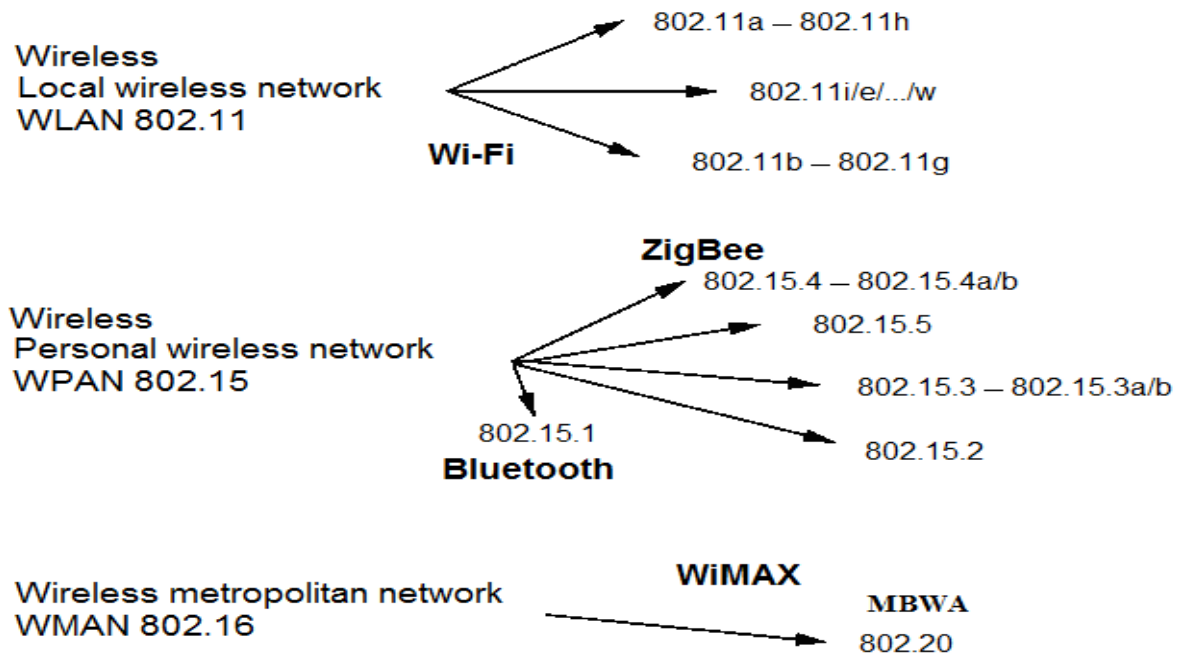


Рис.1.2. Класифікація стандартів безпроводових мереж

WLAN (Wireless Local Area Network – безпроводова локальна мережа) – це локальна мережа, яка побудована за рахунок безпроводових технологій. При такому способі побудови мереж передача даних виконується через радіоэфір, об'єднання пристроїв в мережу відбувається без використання будь яких кабельних з'єднань. IEEE 802.11 набір стандартів зв'язку та передачі даних в безпроводовій локальній мережі. Найбільш поширений спосіб побудови такої мережі є побудова за допомогою Wi-Fi. В даний момент найбільш використовуються такі стандарти, як: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac. IEEE 802.11a — стандарт безпроводових локальних мереж, заснований на безпроводовій передачі даних в діапазоні 5ГГц з максимальною швидкістю передачі даних до 54 Мбіт/с. IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n - стандарти безпроводових локальних мереж, які працюють в 2.4ГГц частотному діапазоні, при максимальній швидкості передачі

даних стандарту IEEE 802.11b в 11 Мбіт/с, стандарту IEEE 802.11b при максимальній швидкості передачі даних 54 Мбіт/с та стандарту IEEE 802.11n до 300 Мбіт/с. Стандарт IEEE 802.11ac працює на частотах 5-6 ГГц. Швидкість передачі даних може бути більшою, ніж 1 Гбіт/с [1].

Стандарт IEEE 802.11 визначає два режими роботи мережі - Ad-hoc (BSS - Basic Service Set) і інфраструктурний ESS - Extended Service Set. Режим Ad-hoc (інакше званий «точка-точка») - це проста мережу, в якій зв'язок між станціями (клієнтами) встановлюється безпосередньо, без використання спеціальної точки доступу. У режимі інфраструктурний ESS безпроводова мережа складається, як мінімум, з однієї точки доступу, підключеної до провідної мережі, і деякого набору безпроводових клієнтських станцій.

Продукти для безпроводових мереж, що відповідають стандарту IEEE 802.11, пропонують чотири рівні засобів безпеки: фізичний, ідентифікатор набору служб (SSID - Service Set Identifier), ідентифікатор управління доступом до середовища (MAC ID - Media Access Control ID) і шифрування.

WPAN (Wireless Personal Area Network - безпроводова персональна мережа) призначена для встановлення безпроводового зв'язку між різними пристроями на відносно невеликій території (наприклад офіс, квартира). Радіус дії WPAN може бути від декількох метрів до декількох сантиметрів. Стандарти, що визначають методи функціонування мережі, описані в сімействі специфікацій IEEE 802.15.

Стандарт IEEE 802.15.1 - це один із перших стандартів класу WPAN. Стандарт базується на специфікації Bluetooth і визначає фізичний рівень (PHY layer) і рівень доступу до середовища (MAC layer). Bluetooth забезпечує обмін інформацією між такими пристроями як персональні комп'ютери (настільні, ноутбуки), мобільні телефони, принтери, цифрові фотоапарати, мишки, клавіатури, джойстики, навушники, гарнітури, колонки на надійній, недорогій та доступній радіочастоті для ближнього зв'язку. Безпроводових канал дозволяє цим пристроям повідомлятися, коли вони знаходяться в радіусі від 1 до 200 м

один від одного (дальність сильно залежить від перешкод і перешкод), навіть у різних приміщеннях. Однак він не розрахований на мережі з низьким енергоспоживанням, що істотно обмежує його поширення в сенсорних мережах Bluetooth працює в неліцензійному частотному діапазоні від 2.4 до 2.4835 ГГц. При цьому використовується широкі захисні полоси: нижня межа частотного діапазону становить 2 ГГц, а верхня - 3,5 ГГц. Частота (положення центру спектра) задається з точністю ± 75 кГц. Кодування сигналу здійснюється за дворівневою схемою GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). В даній частотній полосі виділяється 79 радіоканалів по 1 МГц кожний.

Стандарт IEEE 802.15.2 завдяки якому технологія Bluetooth одночасно може працювати з безпроводовими мережами стандарту IEEE 802.11

Стандарт Wibree розроблений для роботи з Bluetooth. Технологія цифрової безпроводової передачі даних з низьким енергоспоживанням і радіусом дії всього до 10 м. Пізніше Wibree почали називати Bluetooth з ультранизьким енергоспоживанням. Він працює в діапазоні 2,4 ГГц з фізичною швидкістю передачі до 1 Мбіт/с. Основні області застосування включають такі пристрої, як безпроводові клавіатури, наручний годинник та спортивні датчики, де низьке енергоспоживання є одним з ключових вимог.

IEEE 802.15.3 High Rate WPAN (HR WPAN) - це високошвидкісний стандарт WPAN-мереж для високотехнологічних побутових пристроїв. Досягнення надвисоких швидкостей передбачає необхідність застосування ультраширокопосмугових радіосигналів (Ultra wide Band - UWB). Використання смуги 2,4 ГГц і технології модуляції O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying, квадратурна маніпуляція фазовим зрушенням зі зміщенням) дозволяє досягати швидкості передачі в 55 Мб/с на відстань до 100 метрів, одночасно в мережі може працювати 245 користувачів. Захист даних може здійснюватися за стандартом AES 128. У модифікації стандарту 802.15.3a передбачається збільшити пропускну здатність до 480 Мб/с, а в разі специфікації 802.15.3b пропускну спроможність складе від 100 до 400 Мб/с. Стандарт 802.15.3c

розробляється для високошвидкісної (2 ... 3 Гбіт / с) передачі даних в міліметровому діапазоні (57 ... 64 ГГц). В зв'язку з високими швидкостями передачі даних пристрої, що працюють на ньому будуть мати високе енергоспоживання.

802.15.4 і Zigbee часто ототожнюються, адже в основі стандарту Zigbee лежить стандарт 802.15.4, однак є ряд відмінностей. Обидва стандарти використовуються там де потрібен тривалий час роботи, а також висока безпека передачі даних при невеликих швидкостях передачі. Основна особливість технології ZigBee полягає в тому, що вона при відносно невисокому енергоспоживанні підтримує не тільки прості топології безпроводового зв'язку («точка-точка» і «зірка»), а й складні безпроводові мережі з комірчастою топологією з ретрансляцією і маршрутизацією повідомлень. Стандарт 802.15.4 є відкритим і його можна вільно скачати з Інтернету і використовувати, Zigbee ж є наполовину відкритим стандартом: так при використанні його в комерційних цілях необхідно вступати в ZigBee Alliance, що можна вважати мінусом в порівнянні з стандартом 802.15.4. Області застосування даної технології - це побудова безпроводових мереж датчиків, автоматизація житлових і споруджуваних приміщень, створення індивідуального діагностичного медичного обладнання, системи промислового моніторингу та управління, а також при розробці побутової електроніки і персональних комп'ютерів [2].

Порівняльна характеристика наведених стандартів приведена в Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Порівняння стандартів безпроводових мереж

	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
Частотний діапазон	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц
Пропускна здатність, кбит/с	723,1	11000	250
Розмір стека протокола, кбайт	Більше 250	Більше 1000	32-64

Час безперервної роботи від батареї, дні	1-10	0,5-5	100-1000
Максимальна кількість вузлів в мережі	7	10	65536
Діапазон дії, м	10-100	20-300	10-100
Топологія	Точка-точка, зірка, змішана		
Безпека	128-бітне шифрування		
Сфера застосування	Заміщення провідникового з'єднання	Передача мультимедійної інформації (Інтернет, пошта, відео)	Віддалений моніторинг та керування

В результаті можна зробити висновок, що стандарт 802.15.4 і ZigBee найбільше підходять для безпроводової сенсорної мережі, бо вони призначені для мереж де не потрібні високі швидкості передачі, а потрібне низьке енергоспоживання. Також стандарт 802.15.4 являється відкритим.

1.3. Детальний опис стандарту IEEE 802.15.4

Модель OSI мережі ZigBee показана на рисунку 1.3. Стандарт IEEE 802.15.4 визначає фізичний та канальний, який складається з підрівня доступу до середовища передачі MAC і LLC, а специфікація ZigBee визначає мережевий рівень (Network – NWK) та рівень додатків (Application – APL), що складаються із підрівня підтримки додатків (Application Support sub-layer - APS), підрівня об'єктів пристроїв ZigBee (ZigBee Device Object - ZDO) і об'єктів Application Objects, що визначаються виробником ZigBee-пристроїв.

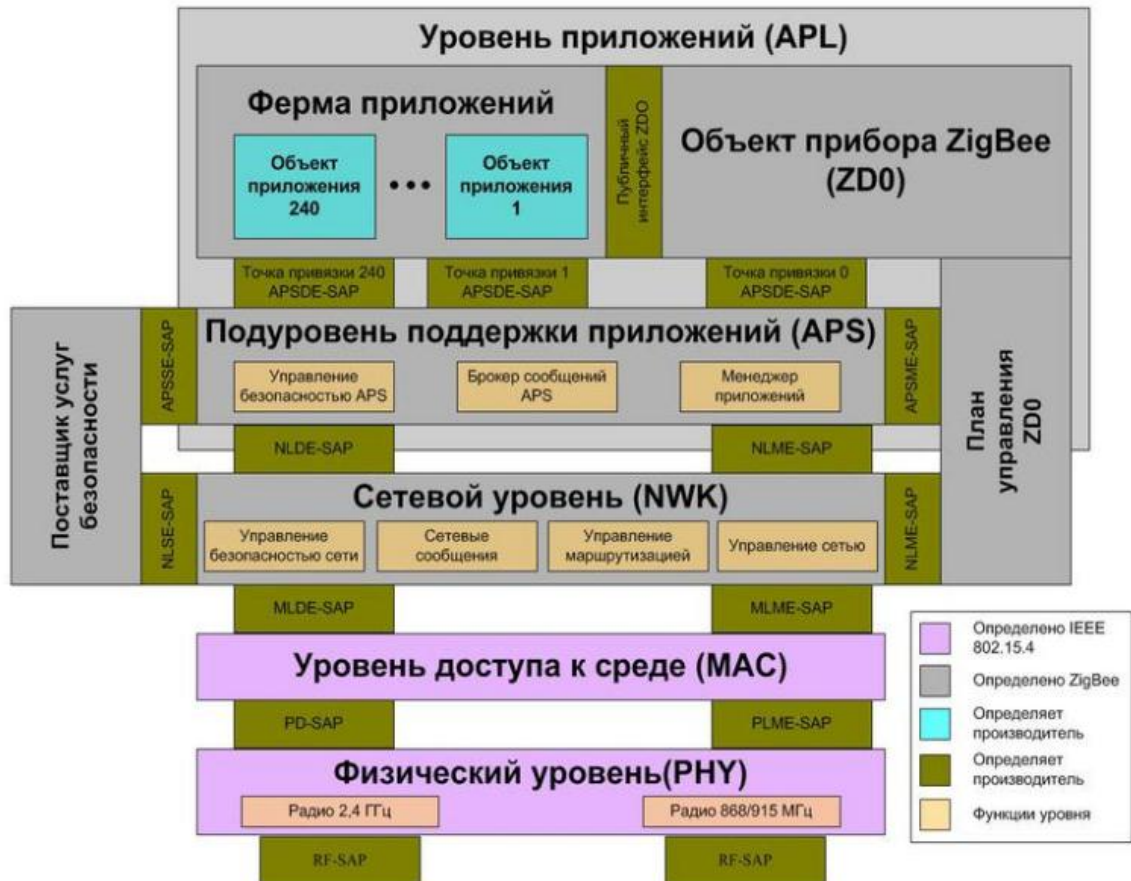


Рисунок 1.3. Рівні моделі OSI мережі ZigBee/IEEE 802.15.4

Фізичний рівень надає дві послуги: фізичне обслуговування даних і фізичне обслуговування управління. Завдання рівня - активація /деактивація радіо-приймача, вибір каналу, визначення рівня енергії, передача і отримання пакетів через фізичне середовище.

Підрівень MAC управляє доступом до радіоканалу, використовуючи метод CSMA / CA. Він також відповідає за передачу маячкових фреймів синхронізацію і забезпечення надійних методів передачі інформації. Стандарт допускає опціональне використання суперфреймової структури повідомлень (Рис. 1.4.). Формат суперфрейма визначається мережевим координатором. Суперфрейм з двох сторін обмежується маячками, ділиться на 16 рівних по довжині слотів і надсилається мережевим координатором. Маячок поміщається на місце першого слота кожного суперфрейма. Координатор може відключити режим повідомлень з маячками. Маячки використовуються для синхронізації приєднаних пристроїв,

для ідентифікації мережі і для опису структури суперфрейма. Будь-які пристрої, які бажають розпочати процес комунікації в проміжок часу між двома маячками, повинні використовувати слотовий механізм доступу CSMA / CA. Передача повідомлень повинна бути закінчена до приходу наступного маячка. IEEE 802.15.4 встановлює два механізми доступу до каналу CSMA / CA, в залежності від типу конфігурації мережі. У мережі без маячків використовується звичайний (безслотовий) механізм доступу CSMA / CA [3]. Кожен раз, коли пристрій збирається почати передачу, воно повинно витримати паузу випадкової величини після того, як канал звільниться. Випадкова затримка потрібна тому, що дуже ймовірно, що багато пристроїв мережі чекають звільнення каналу і тому після його звільнення можуть почати передачу одночасно. Якщо канал зайнятий, то пристрій може повторити спробу після повторної випадкової затримки. Фрейми підтвердження про отримання надсилаються відразу, без використання описаного алгоритму.

У мережі з маячками використовується слотовий механізм доступу CSMA / CA, в якому початок тимчасового слота має співпадати з кордоном суперфрейма мережевого координатора, тобто початок слота для кожного пристрою має бути синхронізоване з початком передачі маячка мережевим координатором. Оскільки пристрій не може почати передачу, поки не знайде маячок, а маячки розсилаються тільки мережевим координатором, то мережевий координатор з допомогою маячків виконує тактування актів обміну в усій мережі. При цьому РНУ рівень повинен забезпечити, щоб всі передачі в мережі починалися одночасно з початком слотів. Введення описаної синхронізації дозволяє зменшити ймовірність одночасної передачі повідомлень декількома вузлами мережі.

Для пристроїв, які вимагають термінової доставки або великої пропускну здатності каналу, мережевий координатор може зарезервувати частину суперфрейма, в якому буде відсутній конкуренція за канал (рис. 1.3.2.), оскільки в цей час мережевий координатор забороняє будь-яку передачу всім іншим

пристроєм. Ця частина слотів суперфрейма називається гарантованими тимчасовими слотами (Guaranteed Time Slots - GTSs).



Рисунок 1.3. Структура суперфрейма с гарантованими часовими слотами

Підрівень LLC виконує зв'язок між мережевим рівнем і підрівнем MAC.

Рівень NWK використовує методи, що забезпечують:

- забезпечення безпеки при передачі фреймів;
- реєстрування в мережі нового пристрою і виключення його з мережі;
- вказівка маршруту фрейму до місця призначення;
- прокладку маршрутів між пристроями в мережі;
- виявлення в мережі найближчих сусідів.

Стандарт визначає протокол і взаємозв'язок пристроїв в наступних трьох ліцензованих радіодіапазоні:

- 868 – 868.6 МГц в Європі (один канал);
- 902-928 МГц в Північній Америці (всього 10 каналів, з кроком центральних частот – 2 МГц, найнижчі з них – 906 МГц, в США 915 МГц);
- 2450 МГц (решта світу, всього 16 каналів з 11 по 26 , крок центральних частот - 5 МГц, найнижча з них - 2405 МГц). Максимальна швидкість передачі становить 250 кбит/с.(Рис.1.4.)

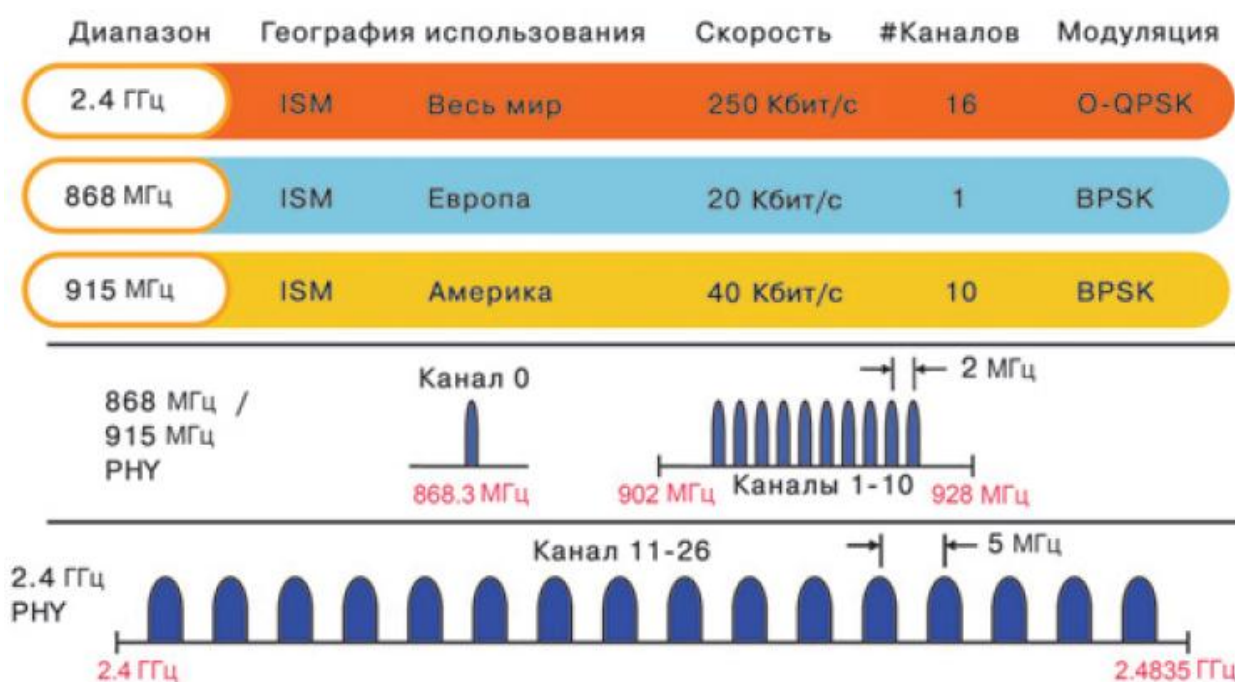


Рисунок 1.4. Коротка характеристика стандарту IEEE 802.15.4

Всі пристрої стандарту можна класифікувати:

1) по функціональності:

- а) повнофункціональні (FFD) – їх можна з'єднувати з будь-яким пристроєм в мережі, будь-яка мережа повинна містити принаймні одне повнофункціональний пристрій FFD;
- б) півфункціональні (RFD) – їх можна з'єднувати тільки з повнофункціональними пристроями, RFD набагато простіше і дешевше, ніж FFD.

2) за призначенням:

- а) Координатор - формує топологію мережі і може встановлювати мости с іншими мережами. У кожній ZigBee мережі є тільки один координатор, також він управляє мережею – призначає PAN ID мережі, роздає короткі адреси, вибирає частоту;
- б) Маршрутизатор - працює як проміжна ланка, передаючи в потрібному напрямку дані від інших пристроїв. Також може запускати функцію додатка;

- с) Кінцеве пристрій - передає дані координатору або маршрутизатора і не може зв'язуватися з аналогічними йому пристроями. Такий стан дозволяє вузлу більшу частину часу перебувати в сплячому стані, що дозволяє економити заряд батареї.

Рівень NWK координатора відповідає за організацію нової мережі, коли це потрібно і призначення адрес нових пристроїв, що підключаються до мережі. Топологія Zigbee-мережі підтримується рівнем NWK і може мати форму зірки, дерева або комірчастої мережі (Рисунок 1.5.).

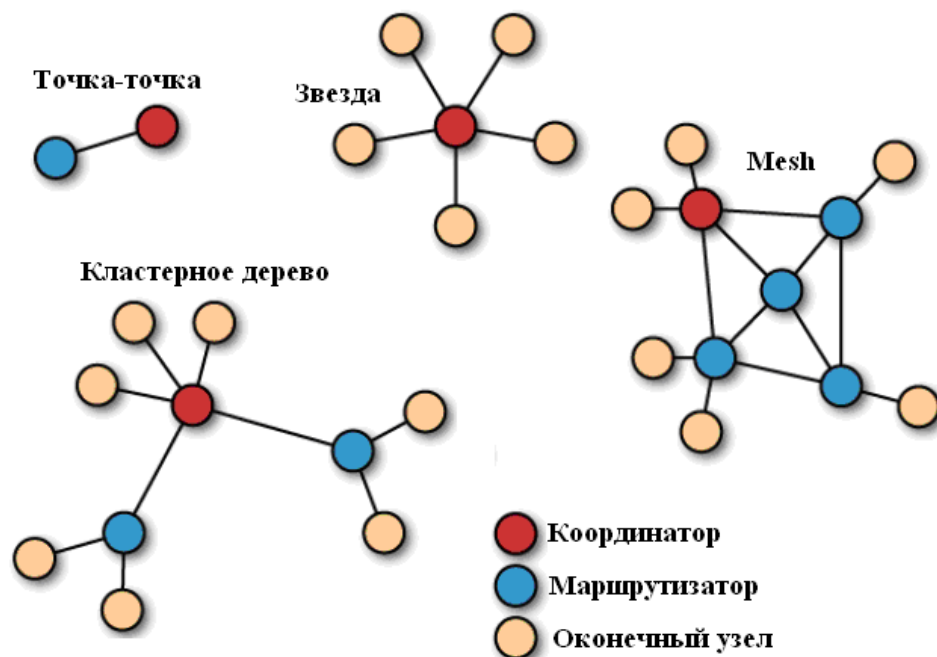


Рисунок 1.5. Топології, які підтримують сенсорні мережі

У топології типу зірки мережу контролюється координатором. Він відповідає за ініціалізацію і обслуговування мережевих пристроїв і всіх кінцевих пристроїв, безпосередньо взаємодіють з координатором. У комірчатій і деревовидній структури мережі координатор відповідає за організацію мережі і вибір деяких ключових параметрів, але мережа може бути розширена за допомогою ZigBee маршрутизаторів. У мережі з деревоподібної топологією маршрутизатори переміщують дані і керуючі повідомлення по мережі, використовуючи ієрархічну стратегію маршрутизації. Деревовидні мережі можуть використовувати маячкових стратегію маршрутизації. Комірчата мережа

повинна забезпечити повну однорангову комунікацію пристроїв, тобто в комірчастої мережі немає пристроїв різних рангів (координаторів, маршрутизаторів і т.п. - всі пристрої рівноправні) [4].

Підрівень APS рівня додатків забезпечує:

- обслуговування таблиць для зв'язування пристроїв мережі на основі інформації про необхідність і можливість зв'язування;
- передачу повідомлень між пов'язаними пристроями;
- визначення групової адреси пристроїв, видалення і фільтрацію повідомлень з груповими адресами;
- відображення 64-бітного адреси в 16-бітний;
- фрагментацію, перекомпонування і транспортування даних.

Підрівень ZDO забезпечує:

- визначення ролі пристроїв в мережі (координатор, маршрутизатор або термінал);
- ініціювання або відповідь на запит з'єднання;
- захист інформації;
- виявлення пристроїв в мережі і визначення, який сервіс вони надають.

1.4. Загальні відомості про енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах.

Безпроводові сенсорні мережі застосовуються для збору даних з пристроїв, оснащених сенсорами: датчиком температури, вологості, освітлення, тобто моніторингу чи інших сферах, де не потрібно високих швидкостей передачі даних, а на перший план виступають надійність, стійкість (здатність до самовідновлення), низька вартість, компактність [5]. Так як датчики часто розташовують у важкодоступних місцях одним з головних вимог до БСМ є їх автономність, виконати яке можна, зменшивши енергоспоживання кожного вузла. Час життя вузла БСМ обмежена часом життя джерела живлення, і

завдання зниження споживання енергії як ніколи стає важливою, а ефективність її рішення безпосередньо впливає на подальший розвиток безпроводових сенсорних мереж [6]. Проблема з енергозбереженням в БСМ посилюється з наступних причин:

1. У порівнянні зі складністю завдань, які вони виконують, а саме - зчитування, обробка даних, самоорганізація і зв'язок - вузли занадто малі за розміром для розміщення джерел живлення високої ємності;
2. В ідеалі, БСМ складається з великої кількості вузлів. Це робить ручні зміни, заміну або перезарядку батареї практично неможливою;
3. Незважаючи на те, що наукова спільнота досліджує досягнення поновлюваних джерел енергії і механізмів самостійної перезарядки, розмір вузлів все ще залишається стримуючим фактором;
4. Вихід з ладу кількох вузлів, може привести цілісну мережу до передчасної фрагментації.

На рисунку 1.6 зображено основні можливі підходи для збільшення часу роботи БСМ.



Рис. 1.5 Класифікація підходів для збільшення енергоефективності в БСМ

a) Оптимізація радіо

Радіо-модуль є основним компонентом, який викликає виснаження батареї вузлів датчика. Для скорочення енергетичного розсіювання через бездротового зв'язку дослідники спробували оптимізувати радіо-параметри, такі як системи кодування і способи модуляції, передача електроенергії та напрямок антени. Оптимізація модуляції має на меті знаходити оптимальні параметри модуляції, які призводять до мінімального споживання енергії радіо. Наприклад, енергетичне виснаження викликається споживана потужність схеми і споживана потужність сигналу, що передається. Для коротких відстаней споживання схеми більше, ніж потужність передачі в той час як для довше розташовується потужність сигналу стає домінуючою. Існуюче дослідження намагається знайти хороший компроміс між розміром сукупності (кількість символів використовується), швидкість передачі інформації (кількість інформаційні біти на символ), час передачі, відстань між вузлами і шумом.

b) Спільні комунікації

Спільні комунікаційні схеми були запропоновані для поліпшення якості отриманого сигналу шляхом використання декількох пристроїв одиночної антени, які співпрацюють для створення віртуальної мультиантенного передавача. Ідея полягає в тому, щоб використовувати те, що дані зазвичай підслуховуються шляхом межування з вузлами через широкоповної природи каналу. Тому шляхом залучення цих вузлів в повторну передачу даних можливо створити просторове різноманітність і боротися з багатокількітним зникненням і затінення [24]. Джанг і ін. [25] зайнявся розслідуваннями, як спільна передача може використовуватися, щоб розширити комунікаційний діапазон і таким чином збалансувати циклічне повторення обов'язки вузлів, оскільки нормальні релейні датчики можуть бути замінені іншими спільними вузлами. Чуй і ін. [26] і Jayaweera [27] порівняв споживання енергії обох SISO (Єдиний Вхід Єдиний Вихід) та віртуальна MIMO (Кілька Входів і Кілька Виходів) системи, і покажіть, що системи MIMO можуть забезпечити найкращі енергозбереження та менші

наскрізні затримки по певним відстаням діапазону передачі, навіть з додатковою службовою енергією, необхідної для навчання МІМО.

c) Управління потужністю передачі

Управління потужністю передачі (УПП) було досліджено для поліпшення енергоефективності на фізичному рівні шляхом коригування харчування передачі радіосигналів [28, 19]. В Кооператив Управління топологією з Адаптацією [20] автори пропонують регулярно скорегувати потужність передачі кожного вузла для обліку нерівного профілю споживання енергії датчиків. Тому вузол з більш високим залишком енергією може збільшити свою потужність передачі, яка потенційно дозволить іншим вузлам зменшити свою потужність передачі, таким чином зберігаючи енергію. Однак стратегія УПП має ефект не тільки на енергію, але також і на затримках, як канал, інтерференції і можливості з'єднання. Дійсно, коли потужність передачі зменшується, ризик інтерференції також зменшується. Крім того, менше вузлів в районі піддаються підслуховуванню. Навпаки, затримка потенційно збільшена, тому що більше транзитних ділянок буде необхідно для передачі пакета. Нарешті, потужність передачі впливає на топологію мережі, тому що потенційна можливість з'єднання між датчиками буде варіюватися, і це також сприяє просторовому повторного використання пропускної здатності, якщо дві зв'язку може статися без інтерференції.

d) Направлені антени

Направлені антени дозволяють сигналам бути відправленими та отриманими в одному напрямку за один раз, що покращує передавальний діапазон і пропускну здатність. Направлені антени можуть вимагати, щоб методи локалізації були орієнтовані, але мультизв'язки може виникати в безпосередній близькості, що призводить до простого повторного використання пропускної здатності. На відмінну від всенаправлених датчиків, які передають в небажаних напрямках, підслуховуюча межа направлених антен і для даного діапазону, вимагає меншого кількості живлення. Таким чином, вони можуть покращити пропускну здатність

мережі та час життя при впливі задержка і можливість об'єднання [21, 22]. Для використання у своїх інтересах властивостей спрямованих антен нові протоколи MAC були розроблені [23, 24]. Однак деякі проблеми, які характерні для направлених антен необхідно розглянути: накладення сигналів, корекції антен і проблеми глухоти [25].

е) Енергоефективне когнітивне радіо

Енергоефективне когнітивне радіо: когнітивне радіо (КР) є інтелектуальним радіо, яке може динамічно вибрати канал передачі в бездротовому спектрі і може адаптувати його передачу і параметри прийому відповідно. Базова Software-Defined Radio (SDR) технологія, як очікують, створить повністю реконфігуровані бездротові приймачі, які автоматично адаптують їх параметри зв'язку до вимог мережі, який покращує обізнаність контексту. Однак КГ вимагає значного споживання енергії в порівнянні зі стандартними пристроями через збільшену складності, включеної для нового і складного технічні можливості [86]. У цьому контексті розробка енергозберігаючих когнітивних радіо-сенсорних мереж є ключовою проблемою в інтелектуальному використанні енергії батареї. Недавнє когнітивне радіо дослідження цікавляться управлінням живленням передавачів [87], остаточне енергетичне призначення каналу, і об'єднання мережевого кодування та КГ. Відкриті теми дослідження включають розробка кросплатформених підходів для MAC, маршрутизації або протоколи кластеризації, які використовують в своїх інтересах когнітивні радіо можливості.

Зменшення об'єму даних

Іншим підходом для зменшення енергоспоживання це зменшення обсягу даних, який буде поставлений на прийом. Два способи можуть бути прийняті спільно: обмеження непотрібних зразків та обмеження розпізнаваних завдань, тому що передача даних і придбання є дорогими з точки зору енергії.

г) Агрегування

У схемах агрегування даних вузли вздовж шляху до приймача виконують сплав даних для скорочення обсягу даних, переданого до нього. Наприклад, вузол може

ретранслювати лише половину або мінімум отриманих даних. Крім того, агрегування даних може зменшити затримку, так як це зменшує трафік, таким чином покращуючи затримки. Однак дані методи агрегування можуть зменшити точність зібраних даних. Дійсно, в залежності від функції агрегування, вихідні дані не можуть бути відновлені приймачем, таким чином інформація точність може бути втрачена.

g) Адаптивна вибірка

Задача розпізнавання споживає енергію і може генерувати непотрібні зразки, який впливає на комунікаційні ресурси і обробні витрати. Адаптивний вибіркові методи коригують частоту дискретизації в кожному датчику при умові, що потреби додатка задоволені з точки зору інформаційної точності або покриття. Наприклад, в наглядovому додатку, малопотужні акустичні детектори можуть використовуватися для виявлення проникнення. Потім коли про подію повідомляють, енергоємні камери можуть бути включені для отримання більш детальної, гранульованій інформації. Просторова кореляція може використовуватися для зменшення частоти дискретизації в місцях де зміни в виявлених даних є низькими.

h) Стиснення даних

Стиснення даних кодує інформацію таким способом, що число бітів необхідне для передачі початкового повідомлення зменшується. Це є енергозберігаючим, бо це зменшує час передачі так як розмір пакетів менший. Однак існуючі алгоритми стиснення неспроможні до датчиків через їх обмежень ресурсу. Тому певні методики були розроблені для адаптації до обчислювальних можливостей і можливостям живлення датчиків. Кімура і ін. [22] розглянули алгоритми стиснення, спеціально призначені для БСМ.

i) Схема сон/пробудження

Стану очікування є основними джерелами споживання енергії в радіо-компоненті. Схеми сну / пробудження мають на меті адаптувати дію вузла для збереження енергії шляхом приміщення радіо в режим очікування

ж) Циклічне переключення

Схема циклу переключення передбачають призначення стану радіостанції вузла в залежності від мережевої активності, щоб мінімізувати час прослуховування і підтримувати режим “сну”(очікування). Ці схеми, як правило, поділяються на три категорії: по вимозі, асинхронні і заплановані зустрічі.

Довідка властивостей кожної категорії дана в Таблиці 2.4. Основані на циклі переключення протоколи, звичайно, є самими енергозберігаючими, але вони страждають від затримки сну, тому що вузол повинен очікувати одержувача для пробудження. Крім того, в деяких випадках для вузла не можливо широко передавати інформацію всім її сусідам, тому що вони не активні одночасно. Нарешті, фіксовані параметри, такі як: прослуховування, сон, період, довжина преамбули та тайм слот є складним і неоднозначним питанням, тому що це впливає на продуктивність мережі. Наприклад, низький робочий цикл зберігає більшу суму енергії, але може рішуче збільшити комунікаційні затримки. Таким чином параметри протоколу можуть бути визначені до розгортання для простоти, хоча це призводить до відсутності гнучкості, або вони можуть бути налаштовані динамічно для кращої адаптації в залежності від стану трафіку.

Тип	По вимозі	Заплановані зустрічі	Асинхронні
Принцип роботи	Датчик прокидається лише тоді, коли інші хочуть передавати дані	Датчик прокидається в той самий час, по відповідному графіку його сусідів. Потім вони сплять до наступної запланованої передачі по графіку	Кожні датчики прокидаються незалежно один від одного, але його період активності повинен збігатися з сусідніми
Широкопосмуговий	Ні	Так	Ні
Синхронізація	Ні	Так	Ні

Енергоефективність	Датчики залишаються активними лише на необхідний мінімальний час	Більше колізій, оскільки датчики прокидаються одночасно після неактивного періоду	Датчикам необхідно прокидатися частіше. Або відправник надсилає довгу преамбулу, або одержувач залишається в стані активності довше
Приклад додатку	Застосунок, орієнтована на події, з низьким циклічним переключенням	Застосунок збору даних з можливістю агрегації	Мобільний застосунок, коли сусідство є непередбачуваним
Зображення			

Таблиця 1.1. Властивості циклу переключення

к) Управління топологією

Коли датчики надмірно розміщені для забезпечення хорошого покриття простору мережі, можливо деактивувати деякі вузли зберігаючи при цьому з'єднання та всі мережеві операції. Протоколи управління топологією використовують резервування для динамічної адаптації топології мережі на основі потреб програми, щоб мінімізувати кількість активних вузлів.

Дійсно, вузли, які не потрібні для забезпечення можливості з'єднання або покриття, можуть бути вимкнені для продовження часу життя мережі, як показано на малюнку 2.9. Місра і ін. [27] пропонують рішення, здатне до підтримки мережевого покриття при зменшенні споживання енергії мережі шляхом активації тільки підмножини вузлів, з мінімальною областю перекриття.

У недавній роботі Карасабун і ін. [28] розглядають проблему вибору підмножини активних підключені датчики для корельованого збору даних. Це дуже корисно в додатках таких як, моніторинг середовища, де дані залежать від місця розташування, оскільки дані неактивних вузлів можна вивести з активних вузлів через просторову кореляцію.

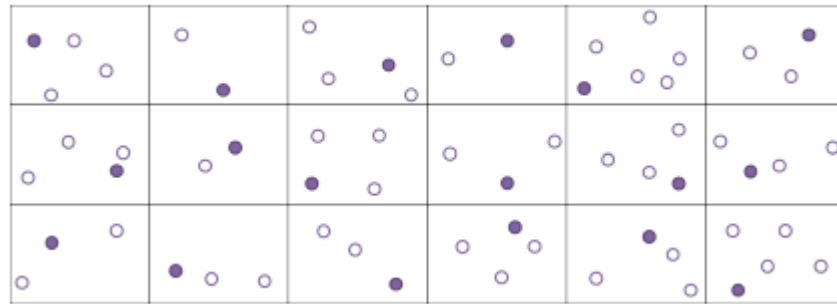


Рис.2.9 Приклад методу контролю топології який застосовуються в мережі. Для покриття повного поля , датчик повинен бути активним в кожній області мережі.

Зменшення енергоспоживання за рахунок маршрутизації

Маршрутизація є ще одним і не менш вагомим фактором, який впливає на енергоефективність безпроводової сенсорної мережі. Зокрема у схемах багато «стрибків» (multi-hop) , датчики які розташовані ближче до базової станції піддаються більшого стресу, якщо ми говоримо про енергоспоживання, тому що через з них проходить практично весь трафік, а передачі більшої кількості пакетів безпосередньо впливає на те, що батарея буде швидше розряджатися. Розглянемо декілька підходів, які можна використати для зменшення енергоспоживання за допомогою маршрутизації.

1) Багатонаправлена маршрутизація

В той час коли однопіправлені протоколи маршрутизації простіші в реалізації, ніж багатонаправлені протоколи, вони мають властивість в більших об'ємах споживати енергію, і навпаки, багатонаправлені протоколи маршрутизації дозволяють енергії бути більше збалансованою серед вузлів шляхом чергування вузлів через які йде передача пакетів. Як приклад, EEMRP (Енергозберігаючий

Багатонаправлений Протокол маршрутизації) [105] виявляє кілька непересічних вузлом шляхів за допомогою функції вартості в залежності від енергетичних рівнів і відстаней транзитного ділянки вузлів і виділяє швидкість трафіку кожній області контуру. ЕЕСА (Енергозберігаючий і турбуючий про колізію) протокол [106] створює два непересічних вузлом і маршруту без колізій між джерелом і приймачем. Багатонаправлені протоколи маршрутизації також покращують надійність мережі шляхом забезпечення декількох маршрутів, який дозволяє мережі відновитися швидше з відмови, тоді як в однонаправлених схемах, коли вузол вичерпує живлення, новий маршрут повинен бути повторно обчислений.

2) Мобільна базова станція

В архітектурі БСМ, яка використовує статичну базову станцію, датчики, розташовані близько до базової станції, розряджають свою батарею швидше, ніж інші датчика, ведучи до передчасного роз'єднання мережі. Це зумовленим тим того, що весь трафік передається через приймачі, які розташовані близько до базової станції. Для збільшення мережевого часу життя можливо збалансувати завантаження між вузлами за допомогою мобільної базової станції, яка переміщується по мережі для збору даних від датчиків в різних частинах. Мобільність приймача також покращує можливість з'єднання і покращує надійність, тому що комунікація відбувається один «стрибок» (single-hop). Таким чином це зменшує конкуренцію, колізії і втрату повідомлень.

Кластерна архітектура

Кластерна архітектура організовує мережу в кластера, де кожний датчик управляється головним датчиком, який називається голова кластера(ГК). Голова кластера координує дії інших учасників(датчиків) і відповідає за зв'язок між базовою станцією або іншими головами кластерів. Метод групування датчиків в кластери збільшують енергоефективність, тому що він допомагає зменшити енергоспоживання декількома способами:

- 1) Зменшують діапазон комунікацій в кластери, що вимагає меншої кількості енергії на передачу;

- 2) Зменшує кількість енергозатратних операцій таких як: координування і агрегація, так за ці функції відповідає голова кластера;
- 3) Є можливість деяким датчикам перейти в режим сну поки голова кластера виконує свої функції, тобто виконує передачу даних до базової станції чи між головами кластера.
- 4) Виконується балансування енергії датчиків за допомогою ротації голови кластера.

Окрім енергоефективності, кластерна архітектура покращує масштабування мережі і при цьому зберігається ієрархія мережі.

Зарядка

Ще одним з методів енергозбереження є збір енергії та безпроводна зарядка. Загальний підхід обох методів полягають в перезарядці батареї датчиків без людського втручання.

1) Збір та перетворення енергії

Даний метод полягає в тому, що датчики отримують енергію від навколишнього середовища, тобто енергію сонця, вітру, кінетичну енергію. В порівнянні з традиційними датчиками, датчики які мають властивість перезаряджатися можуть працювати безперервно і, теоретично, протягом необмеженого відрізка часу. Вони перетворюють навколишню енергію в електроенергію і потім або споживають його безпосередньо або зберігають його для більш пізнього використання. Архітектура збору та перетворення енергії часто вимагає енергетичних схем прогнозування, щоб ефективно управляти доступною потужністю. Дійсно, сенсори вимагають оцінки еволюції енергії, щоб динамічно регулювати свою поведінку. Відповідно, вони можуть оптимізувати такі критично важливі параметри як: вибірка рівня, потужність передачі, циклічне переключення, щоб адаптувати споживання енергії відповідно до періодичності та величини джерела, що вилучається. Важливо відзначити, що вузли залишаються обмеженими енергією, яку вони отримують в різних об'ємах в різні час, таким чином, вони все ще повинні здійснити енергозберігаючі механізми.

Наприклад, датчики, що використовують сонячні батареї, щоб поповнити батареї працюють більш інтенсивно під час денного часу. Вночі, вузли можуть перейти до консервативного режиму, щоб використовувати збережену енергію. Крім того, вузли можуть мати нерівномірний розподіл залишків енергії через різницю в кількості накопиченої енергії, і це повинно бути взято до уваги, проектуючи протоколи [115]. Наприклад, вузли з низьким залишком енергії можна призначити більш довгі періоди сну і менші діапазони передачі, в той час як датчикам з більш високим залишком енергії буде надаватися більша перевага коли вибирається маршрут. Інша відкрита перспектива - розробка протоколів, які розглядають погіршення батареї з часом (витік, втрата зберігання) [116], який буде впливати на продуктивність мережі.

2) Безпроводова зарядка

Безпроводова зарядка: очікується, що останні досягнення в процесі безпроводової передачі електроенергії підвищать стійкість БСМ та дозволять їм постійно функціонувати, оскільки ці методи можуть бути використані для передачі потужності між пристроями без необхідності будь-якого контакту між передавачем і приймачем. Безпроводова зарядка в БСМ може бути досягнута двома способами: електромагнітним (ЕМ) випромінюванням та магнітно-резонансним з'єднанням. [117] Показано, що багат шарова електромагнітна технологія випромінювання застосовується до БСМ з надзвичайно низьким енергоспоживанням та низьким ступенем активності (наприклад, температура, світло, вологість). Це пов'язано з тим, що ЕМ хвилі страждають швидким падінням енергоефективності на відстані, а технологія активного випромінювання може стати проблемою безпеки для людей. Навпаки, магнітно-резонансне з'єднання, мабуть, є найбільш перспективним методом для вирішення енергетичних потреб БСМ завдяки більш високій ефективності в межах декількох метрів. Застосування безпроводової передачі енергії в БСМ є поширеним. Він вже був застосований до медичних сенсорів та пристроїв, для поповнення датчиків, вбудованих в бетон бездротовим способом [119], та

живлення наземного датчика від БПЛА [120]. Поява технології безпроводової зарядки повинна дозволити подолати енергетичне обмеження, оскільки тепер можливо поповнити елементи мережі більш керованим чином. Таким чином, деякі дослідники вже досліджували використання мобільних зарядних пристроїв, які безпосередньо передають потужність для розгорнутих датчиків [121-124]. Новим викликом в технології безпроводової зарядки є енергетична співпраця, оскільки датчики тепер можуть передавати енергію між сусідами. Таким чином, у майбутніх безпроводових мережах датчики передбачають можливість збирати енергію з навколишнього середовища та передавати енергію іншим датчикам, що робить мережу самодостатньою [125]. Для цього останні дослідження демонструють доцільність передачі енергії в багатонадійному режимі [126, 127], що відкриває нові перспективи для розробки протоколів безпроводового заряджання та енергетичних кооперативних систем.

Висновок до розділу:

В даному розділі були оглянуті загальні поняття безпроводових сенсорних мереж.

Було зображено загальна архітектура БСМ, сенсорного датчика та описано основні переваги безпроводових сенсорних мереж, завдяки яким вони почали використовуватися для збору даних з пристроїв, оснащених сенсорами: датчиком температури, вологості, освітлення, тобто моніторингу чи для автоматичного вмикання світла при вході людини в кімнату, води і інших побутових речей (наприклад, в системі «розумний дім»). Різноманітність додатків створених на БСМ, приводить до покращення життя людини.

Наведено класифікацію безпроводових мереж, які діляться на три основні групи: WPAN, WMAN і WLAN. Після чого було проведений детальний опис та порівняння характеристик (у вигляді таблиці) стандартів безпроводових сенсорних мереж. В результаті порівняння отримуємо, що технологія ZigBee, заснована на стандарті IEEE 802.15.4 і також відома як «сенсорні мережі», має найтривалішу автономну роботу та максимальну кількість вузлів. Проведений детальний опис стандарту IEEE 802.15.4, що дозволяє більш детально побачити принцип роботи і побудову даного стандарту.

Описані всі можливі напрямки і підходи, які можливо використовувати для збільшення енергоефективності мережі, зроблений короткий аналіз, вказані переваги і недоліки кожного підходу.

2. РОЗВИТОК СПОСОБІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.

Електроживлення вузлів безпроводових сенсорних мереж (БСМ) із самоорганізацією у більшості випадків здійснюється від батареї. У зв'язку з цим в системі управління БСМ виділена підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів. У зв'язку з цим проблему енергозбереження можна вирішувати на різних рівнях еталонної моделі. Наприклад на фізичному, каналному, мережевому і прикладному. Отже, ми розглянемо декілька способів енергозбереження.

2.1. Використання MAC протоколів

Так як енергетична ефективність є першочерговою задачею в безпроводових сенсорних мережах, вона також впливає на конструкцію MAC протоколу. Енергія споживається не тільки при передачі та прийому даних, але і при неактивному прослуховуванні (прослуховування незайнятого каналу для того, щоб отримати можливий трафік). Іншими причинами енергоспоживання є повторна передача даних (через колізії). Це коли вузол отримує більше, ніж один пакет одночасно і вони зіштовхуються, навіть коли вони збігаються тільки частково. Всі пакети, які викликають колізію, повинні бути відкинуті, і повторно передати їх, що збільшує споживання енергії. Поширений метод енергозбереження характеризується динамічним управлінням електроспоживання (ДКЕ), де ресурси можуть розподілятися між різними режимами роботи, такими як режим активності, простою, сну [7]. В мережі режим активності може містити в собі кілька різних режимів діяльності, наприклад, передача і прийом. Без управління живленням, більшість трансиверів буде перемикатися між передачею / прийомом і режимом очікування, хоча режими прийому і очікування, як правило, споживають однакову кількість енергії. Проте, значної економії енергії можна домогтися шляхом переведення

пристрою в режим сну з низьким енергоспоживанням. Періодичні моделі трафіку часто застосовуються в сенсорних мережах (наприклад, моніторинг навколишнього середовища) і багато мереж можуть отримати вигоду з MAC схем які не передбачають постійну активність вузлів. Замість цього, вони періодично дозволяють вузлам отримати доступ до середовища для передачі даних і переводити свої радіоприймачі в режим сну з низьким енергоспоживанням між передачами. Проміжок часу, який сенсорний вузол проводить в активному режимі, називається робочий цикл, який, зазвичай, дуже малий через нечастих і коротких передач даних, що відбуваються в більшості сенсорних мереж. Стратегія може мати локальну або глобальну область застосування, або обидві одночасно. Локальна DPM стратегія покликана звести до мінімуму енергоспоживання окремих вузлів, забезпечуючи кожному підсистему тією кількістю енергії, яке є достатнім для виконання завдання. Коли завдання для обробки відсутні, DPM стратегія змушує деякі підсистеми працювати в режимі найбільш економічного енергоспоживання або переводить їх в сплячий режим. Глобальна DPM стратегія намагається мінімізувати енергоспоживання всієї мережі шляхом визначення загальномережевого стану сну [8].

Існують різні способи досягнення цієї мети. Один із способів, дозволити окремим вузлам визначати свої власні графіки сну і розділяти ці графіки зі своїми сусідами для запуску узгодженого зчитування і ефективного міжвузлового зв'язку. Це називається синхронним сном. Проблемою цього підходу, є те, що сусідами вузли повинні синхронізувати час так само, як і графіки, а це енергоємний процес. Інший спосіб, дозволити окремим вузлам залишати свій графік сну при собі; а вузол, який ініціює зв'язок, повинен відправити преамбулу до отримання підтвердження від свого приймаючого партнера. Цей підхід відомий як асинхронний графік сну, він уникає необхідності синхронізації графіків. Але як побічний ефект, це може викликати затримку при передачі даних. У обох підходах окремі вузли періодично активуються, для визначення

наявності вузлів бажаючих зв'язатися з ними, а також для обробки завдань, які очікують у черзі.

Першим кроком на шляху розвитку стратегії локального управління електроживленням є розуміння того, як енергія витрачається різними підсистемами безпроводового сенсорного вузла. Це знання дозволяє уникнути непотрібних дій і економити бюджет енергії. Крім того, воно дозволяє цінувати загальний рівень розсіювання енергії у вузлу і те, як цей показник впливає на тривалість існування всієї мережі. В безпроводовому сенсорному вузлу існують такі підсистеми, як: підсистема процесора, підсистема зв'язку, активна пам'ять, частота шини і RAM-таймінг, підсистема живлення.

Більшість MAC протоколів діляться на категорії: неконкурентні і конкурентні протоколи (Рисунок 2.1.) [9].

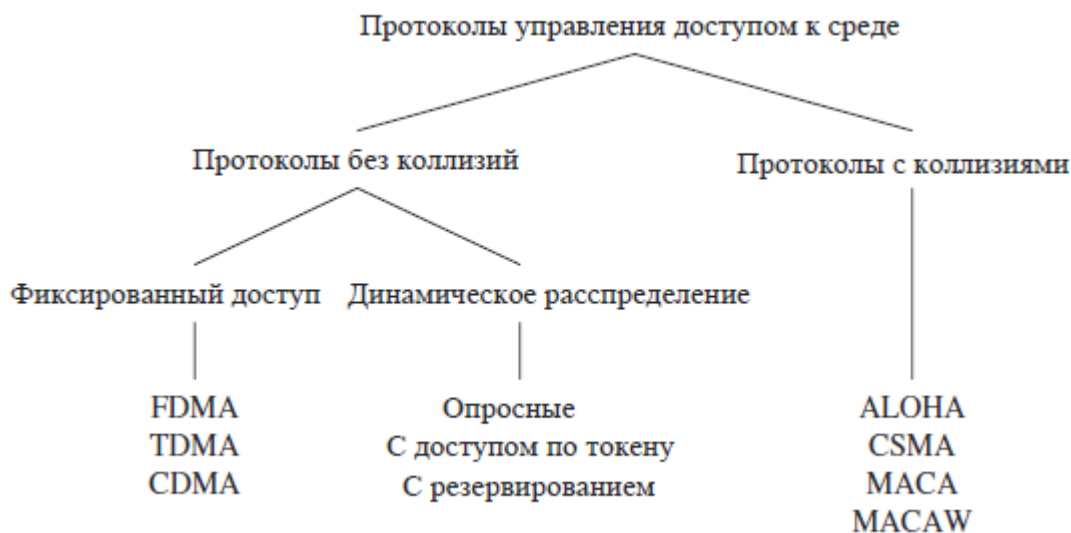


Рисунок 2.1. Класифікація і приклади протоколів доступу до середовища

Конкурентні протоколи надають можливість вузлам одночасно конкурувати за доступ до середовища, забезпечуючи при цьому механізм скорочення числа колізій і відновлення після них. Популярною схемою конкурентного доступу до середовища є підхід множинного доступу з контролем несучої (CSMA), в тому числі його різновиди з виявленням колізій (CSMA / CD) і запобіганням колізій (CSMA / CA). У схемі заснованої на CSMA / CD спочатку

зчитує середовище, для того, щоб визначити чи знаходиться середовище в режимі очікування або вона зайнята. Якщо буде виявлено, що навколишнє середовище зайняте, відправник утримається від відправки пакета. Якщо середовище знаходиться в режимі очікування, відправник може ініціювати відправку даних. Так як в БСМ колізії відбуваються в приймачі, то відправник не буде знати про них. Проблема прихованої станції виникає коли два відправляючих пристрою А і С можуть досягти приймача В, але не можуть підслухати сигнали один одного (див. Рис. 2.2 де колами показані передачі і завади діапазонів вузлів). Тому для А і С існує можливість одночасного надсилання даних на В, в результаті чого колізії в В будуть їм недоступні для виявлення. Пов'язаною проблемою є проблема засвіченою станції, де С хоче передати дані на четвертий вузол D, але вирішує очікувати, тому, що чує безперервну передачу від В до А. Однак передача В не створюватиме перешкоди при прийомі даних від D, поки D знаходиться за межею діапазону передачі В. Як наслідок, рішення вузла С очікувати затримуючи свою передачу є необов'язковим.

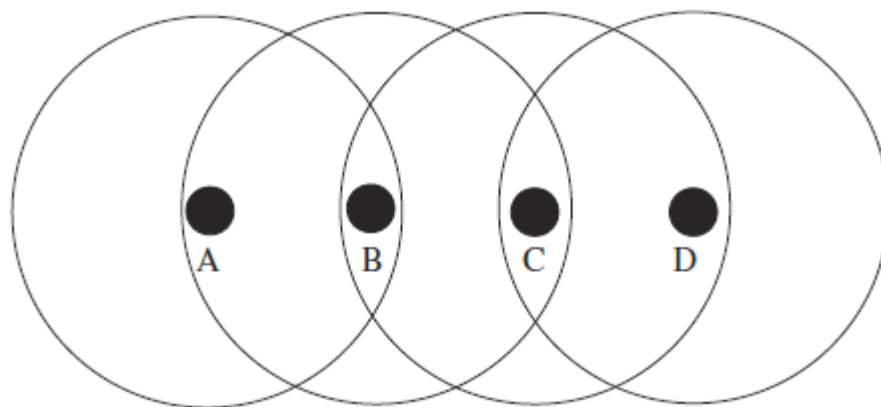


Рисунок 2.2. Приховані і видимі термінали

Неконкурентні або засновані за графіком МАС протоколів розподіляють ресурси для окремих вузлів, з метою забезпечення монопольного використання ресурсів (наприклад, доступ до безпроводового середовища) тільки одним вузлом. Цей підхід виключає колізії між сенсорними вузлами, демонструючи ряд чудових особливостей. По-перше, фіксований розподіл часових інтервалів

дозволяє вузлам точно визначити момент, коли вони повинні активувати своє радіо для передачі або прийому даних. Протягом всіх інших інтервалів, радіо (або навіть весь сенсорний вузол) може бути переключене в сплячий режим з низьким енергоспоживанням. Тому, типові неконкурентні протоколи вигідні з точки зору енергоефективності. Але їх використання також має недоліки. При проектуванні великої мережі або її масштабуванні складно скласти точний графік роботи для всіх вузлів, ефективно використовуючи пропускну здатність, на відмінно від конкурентних протоколів. Деякі MAC протоколи нелегко вписати в цю класифікацію, так як вони поєднують характеристики обох (неконкурентних і конкурентних) методів. Ці гібридні підходи часто націлені на спадкування переваг даних основних категорій, зводячи до мінімуму їх недоліки.

До неконкурентних протоколів відносяться протоколи на основі TDMA такі як: DEE-MAC, TRAMA, DRAND, Y-MAC [10]. Типовими конкурентними протоколами є S-MAC (Sensor-MAC), T-MAC (Timeout-MAC) та U-MAC (Utilization-MAC). До гібридних відносяться такі протоколи, як: Z-MAC (Zebra MAC), A-MAC (Advertisement-based MAC).

2.2. Використання протоколів маршрутизації для енергозбереження в БСМ

БСМ складаються з безлічі маленьких вузлів з функціями детектування, обчислення, і можливістю безпроводового зв'язку. Вузли мають обмежений енергоресурс. Тому протоколи маршрутизації відіграють значну роль в роботі безпроводових сенсорних мереж (БСМ). Завдяки їм здійснюється самоорганізація вузлів і доставка пакетів оптимальними маршрутами відповідно до алгоритмів, декларованими в використовуваному в мережі протоколі.

Основні вимоги до ефективних алгоритмів маршрутизації:

1. енергетична ефективність: протоколи маршрутизації повинні максимально ефективно використовувати живлення;
2. масштабованість: безпроводові сенсорні мережі складаються із сотень вузлів, тому протоколи маршрутизації повинні працювати з цією кількістю вузлів;
3. автономність: видалення певного вузла мережі не повинно вплинути на її роботу. Так як в мережі не повинно бути центрального вузла, будь-який вузол може виконувати функції маршрутизації віддаленого;
4. стійкість: датчики можуть раптово припинити роботу через зовнішні причини або витрати заряду акумулятора. Протоколи маршрутизації повинні впоратися з цією проблемою таким чином: коли струм у вузлах пропадає, повинен бути використаний альтернативний маршрут;
5. гетерогенність пристроїв: хоча в більшості випадків застосування безпроводових сенсорних мереж покладаються на однорідність вузлів, введення різних видів датчиків може дати значну перевагу;
6. мобільність: у багатьох випадках вузли можуть змінювати своє положення в процесі функціонування, тому протоколи маршрутизації повинні враховувати це.

Отже, застосування ефективних протоколів маршрутизації дозволяє максимізувати час життя мережі і при цьому враховуються всі вище сказані фактори, так як, практично неробочу мережу, яка буде працювати дуже довго, але неефективно будувати ніхто не буде. Хоча максимізація часу дуже важливо для БСМ, оскільки вузли є необслуговувані, і час життя мережі визначається як часом від початку її роботи до моменту виходу з ладу першого вузла. У більшості випадків вихід з ладу вузлів мережі обумовлений виснаженням джерела енергії.

Протоколи маршрутизації в БСМ вирішують такі завдання як:

1. Мінімізація енергоспоживання вузлів мережі і збільшення загального часу життя всієї мережі.
2. Маршрутизація і адресація вузлів.

3. Самоорганізація вузлів мережі (самоконфігурування, самовідновлення та оптимізація).
4. Збір і агрегація даних.
5. Швидкість передачі та обробки даних в мережі.
6. Максимізація зони покриття мережі.
7. Якість обслуговування (QoS).

Також існують три основних види алгоритмів маршрутизації БСМ:

- 1) розподілені алгоритми – комунікація здійснюється за допомогою передачі повідомлень;
- 2) централізовані алгоритми – вони виконуються на вузлу, який має інформацію про всю мережу. Дані алгоритми досить дорогі для використання через високу вартість передачі даних для отримання стану функціонування всієї мережі;
- 3) місцеві алгоритми – вузли використовують дані, отримані з ближньої області. З використанням цієї інформації, алгоритм може виконуватися на одному вузлу [12].

Класифікація протоколів маршрутизації:

- 1) Засновані на місцезнаходженні вузлів (MECN, SMECN, GAF, GEAR, Span, TBF, BVGF, GerRaF);
- 2) Спрямованні на агрегацію даних (SPIN, EAD, COUG, ACQUIRE, Energy-aware Routing, Home Agent Based Information Dissemination);
- 3) Ієрархічні (LEACH, HEED, TEEN, APTEEN, PEGASIS)
- 4) Засновані на мобільності (SEAD, TTDD, Data MULES, Join Mobility and Routing);
- 5) Мульти-орієнтованні (N-to-1, Sensor-Disjoint Multipath);
- 6) Засновані на якості обслуговування (SAR, SPEED, Energy-aware routing);
- 7) Засновані на гетерогенності (IDSQ, CADR, CHR).

Застосування даних протоколів, як працюють на мережевому рівні еталонної мережевої моделі є дуже важливим і хорошим способом для збільшення енергозбереження використовуючи програмний спосіб, а не фізичний. Більш детальний огляд всіх ієрархічних протоколів енергозберігаючих протоколів маршрутизації ми виконаємо у наступному розділі.

Висновки до розділу:

Так як зменшення енергоспоживання є однією з основних задач в даному розділі було розглянуті можливі способи енергозбереження. Проблеми енергоспоживання можна вирішувати різними способами, тобто на різних рівнях моделі OSI, починаючи від фізичного і закінчуючи прикладним.

Було розглянуто основне призначення та використання MAC протоколів. Використання MAC протоколів є дуже актуальним при побудові БСМ, так як енергія споживається не тільки при передачі та прийому даних, але і при неактивному прослуховуванні, повторній передачі даних (колізії) і інші. Також описана класифікація MAC протоколів, та загальні принципи їх роботи, що дозволяє різними способами зменшувати енергоспоживання.

Розглянуті основні вимоги до алгоритмів маршрутизації, види алгоритмів маршрутизації та класифікацію, тому що застосування ефективних алгоритмів маршрутизації дозволяє збільшити час життя мережі.

3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БСМ

3.1. Детальний опис і оцінка енергоефективності MAC протоколів

Для оцінки ефективності MAC протоколів детально розглянемо такі протоколи, як: S-MAC, T-MAC, WiseMAC, Z-MAC

Розглянемо такі конкурентні MAC протоколи:

1) S-MAC - Sensor-MAC

Сенсорний MAC протокол (S-MAC - Sensor-MAC) метою є зниження зайвих енерговитрат, забезпечуючи хорошу масштабованість і запобігання колізій. S-MAC [8] приймає підхід робочого циклу, тобто, вузли періодично переходять то в стан прослуховування, то в стан сну (Рисунок 3.1.).



Рисунок 3.1. Період сну та прослуховування

Кожен вузол вибирає свій власний графік, хоча, більш переважно, коли вузли синхронізують свої графіки, щоб слухати і спати в один і той же час. В цьому випадку, вузли, що використовують один і той же графік, належать до одного віртуального кластера, що не означає фізичну кластеризацію і всі вузли можуть вільно зв'язуватися з вузлами за межами кластера. Вузли, періодично, обмінюються графіками з сусідами за допомогою SYNC повідомлень, тобто, кожен вузол знає, коли будь-який з його сусідів буде активним. Якщо вузол А, хоче зв'язатися з сусіднім вузлом В, який використовує інший графік, вузол А буде чекати поки вузол В слухає, а потім ініціює передачу. Конкуренція в середовищі, вирішується шляхом використання схеми RTS / CTS.

Для вибору графіка вузол спочатку слухає середу протягом певного періоду часу. Якщо вузол отримує графік від свого сусіда і приймає його, то цей вузол стає послідовником. Вузол транслює свій новий графік після випадкової затримки t_d (щоб уникнути можливої колізії з декількох нових послідовників). Вузли можуть приймати кілька графіків, тобто, якщо вузол приймає інший графік, після того як відправив свій власний графік, він прийме обидва графіка. Крім того, якщо вузол не чує графіки від інших вузлів, він визначає свій власний графік і транслює його всім можливим сусідам. Цей вузол стає синхронізатором, і інші вузли починають синхронізувати себе з ним.

S-MAC, додатково розділяє інтервал прослуховування на підінтервал прийому SYNC пакетів і підінтервал прийому RTS повідомлень (верхній графік на Рис. 3.2.). Кожен підінтервал, також ділиться на невеликі інтервали, для полегшення контролю несучої. Вузол намагається відправити SYNC або RTS повідомлення, випадково вибравши часовий інтервал (в межах підінтервала SYNC або RTS відповідно), і зчитує несучу для діяльності від моменту коли приймач починає прослуховування обраного інтервалу. Якщо активність не виявлена, вузол виграє середу і починає передачу. Рисунок ілюструє тимчасову взаємозв'язок між приймачем і різними відправниками: один відправляє SYNC повідомлення, (середній графік), а ще один відправляє дані (нижній графік).

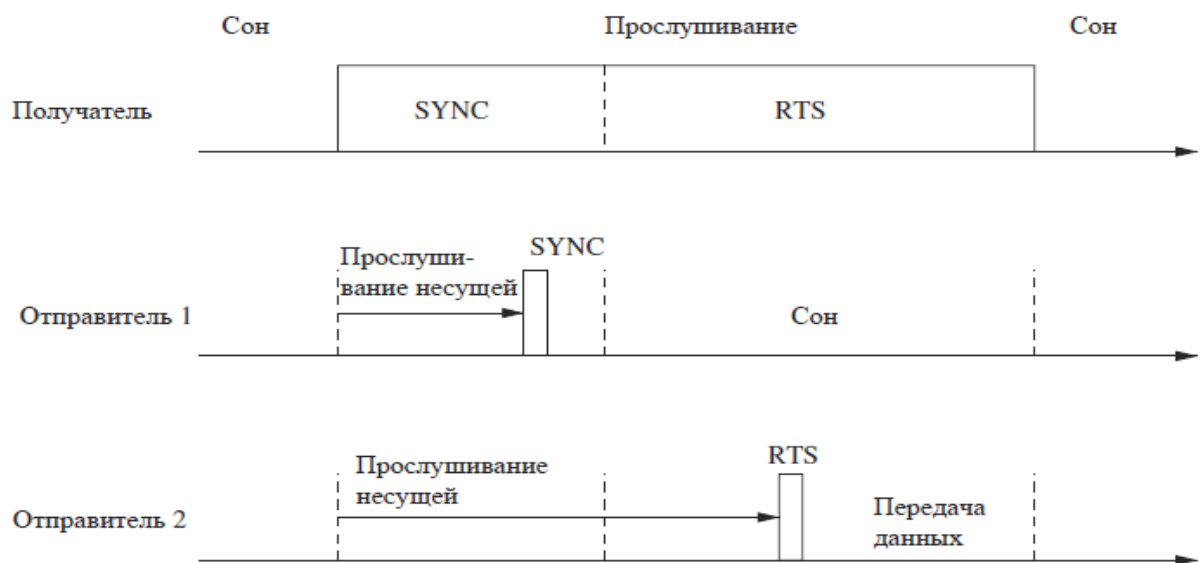


Рисунок 3.2. Співвідношення повідомлень протоколу S-MAC в часі

Один цикл періоду прослуховування і період сну називається кадром. У протоколі S-MAC є робочий цикл, який є співвідношенням між періодом прослуховування та довжиною кадру. У протоколі S-MAC із фіксованою довжиною кадру, прослуховування буде залежати від параметрів фізичного рівня та рівня MAC. Для встановлення періоду сну користувач може встановити значення робочого циклу від 1% до 100%.

В S-MAC протоколів енергозбереження (E_s) розраховується так:

$$E_{\text{збер}} = \frac{T_{\text{сну}}}{T_{\text{кадру}}} \quad (3.1)$$

Де:

$$T_{\text{кадру}} = T_{\text{прослуховування}} + T_{\text{сну}} \quad (3.2)$$

Звідси виходить:

$$E_{\text{збер}} = 1 - \frac{T_{\text{прослуховування}}}{T_{\text{кадру}}} \quad (3.3)$$

Якщо енергозбереження пов'язати з робочим циклом, то:

$$\text{Робочий цикл} = \frac{T_{\text{прослуховування}}}{T_{\text{кадру}}} \quad (3.4)$$

Звідси:

$$E_{\text{збер}} = 1 - \text{Робочий цикл} \quad (3.5)$$

З вищевказаним рівнянням можна зробити висновок, що енергозбереження залежить від значення робочого циклу. Чим більше значення робочого циклу, тим більша кількість використаної енергії та зменшення енергозбереження. Тому, при виконанні, максимальне значення робочого циклу становить 10%

2) T-MAC - Timeout MAC

Період прослуховування в S-MAC має фіксовану тривалість, тобто, навіть наявність невеликого трафіку, витрачає енергію. З іншого боку, при важкому трафіку, фіксованої тривалості може не вистачати. Тайм-аут MAC протокол (T-

MAC), є варіацією S-MAC, який використовує активний період, адаптується до щільності трафіку. Вузли прокидаються на початку інтервалу, для короткого прослуховування на наявність активності, і повертаються в сплячий режим, якщо не було виявлено ніяких передач. Коли вузол передає, приймає або чує повідомлення, він залишається активним протягом короткого періоду часу після завершення передачі повідомлення, щоб побачити, чи спостерігається додатковий трафік. Цей короткий тайм-аут інтервал дозволяє вузлу якомога швидше повернутися в режим сну. Результатом є те, що час активності вузла буде збільшуватися при важкому трафіку і скорочуватися при легкому (Рисунок 3.3.). Для зменшення можливих колізій, кожен вузол чекає протягом випадкового періоду часу протягом фіксованого конкурентного інтервалу перед доступом до середовища. Наприклад, на Рисунку 3.1.3. (а), вузли А і С намагаються відправити дані вузлу В, але вузол А виграє середу і передає свої дані вузлу В. Мінімальний час протягом якого вузол залишається активним для прослуховування діяльності виражається як T_A , і воно повинно бути досить довгим щоб почути можливе CTS повідомлення від одного зі своїх сусідів. Як тільки вузол почує CTS, він буде знати, що інший вузол виграв середу. Цей вузол, потім, залишається активним до закінчення передачі, яку можна спостерігати, підслухавши підтвердження (ACK), відправлене вузлом В. Ця подія ініціює початок наступного конкурентного інтервалу і вузол буде мати можливість передати свої дані, якщо виграє середу.

Рисунок 3.3. (а) також ілюструє можливу проблему, яка виникає в T-MAC. Припустимо, що повідомлення протікають зверху вниз, тобто, вузол А відправляє тільки вузлу В, вузол В тільки вузлу С і т.д. Кожен раз, коли вузол З хоче відправити повідомлення вузлу D, він повинен конкурувати за середу, що може призвести або до втрати вузла В (який може передати RTS до того, коли вузол З відправить) або вузла А (вузол З підслухає CTS передане вузлом В). У той час, коли вузол З залишається активним почувши CTS повідомлення вузла В, його передбачуваний приймач (вузол D) не знає про намір вузла З передати

йому дані, і отже перейде в сплячий режим по закінченню ТА. Ця проблема називається проблема раннього сну, і одне з можливих її рішень показано на Рисунку 3.3. (б). У техніці майбутнього RTS, вузол з відкладеними даними, може проінформувати свій намічений приймач шляхом передачі майбутнього RTS (FRTS) пакета, відразу після підслуханої CTS. Вузол D, отримавши FRTS повідомлення, знатиме, що вузол З намагатиметься відправити йому дані, і отже, залишиться активним. Однак відправка FRTS повідомлення відразу після CTS, може створити перешкоди вузла В при прийомі даних від вузла А, тому, вузол А спочатку відправляє фіктивне повідомлення, зване Відправка даних (DS), щоб затримати передачу реальних даних.[19] DS має такий же розмір як і FRTS , що може привести до їх зіткнення у вузлу , проте, це не призведе ні до яких наслідків, так як воно не містить ніякої корисної інформації.

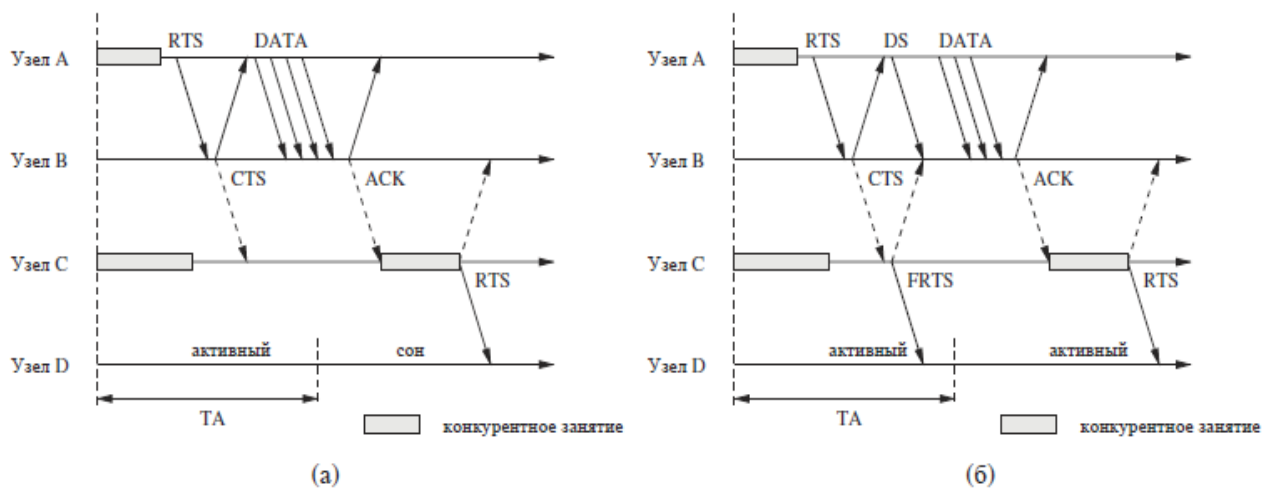


Рисунок 3.3. Передача даних в протоколі T-MAC. Проблема «раннього засинання» (а) і техніка майбутнього запиту на відправку (б)

У підсумку, T-MAC це адаптивний підхід, який дозволяє регулювати інтервали сну і активності вузлів, в залежності від завантаженості трафіку. В T-MAC вузли відправляють повідомлення пакетами різної довжини, і переходять у режим сну між такими пакетами, щоб зберегти енергію. Як і S-MAC, T-MAC концентрує обмін повідомленнями в невеликі тимчасові періоди, що

неефективно при високих навантаженнях на трафік. Нарешті, призначені приймачі будуть зберігати активність, використовуючи повідомлення, що вказують на майбутні передачі, що може значно збільшити час просто прослуховування (і, отже, енергоспоживання) вузлів.

3) WiseMAC – Wireless Sensor MAC

WiseMAC - це MAC протокол, пов'язаний з енергоспоживанням спадного каналу зв'язку в інфраструктурі безпроводової сенсорної мережі, тобто, зв'язок від базової станції до сенсорних вузлів. Щоб уникнути споживання енергії під час прослуховування, WiseMAC [8] покладається на техніку відбору преамбули. У цій техніці, базова станція передає преамбулу, що передують фактичній передачі даних, щоб повідомити приймає вузол (дивитися лівий графік на Рис. 3.4). Всі сенсорні вузли зчитують середовище (прослуховують канал) з фіксованим періодом T_w , але з незалежним і постійним порівняльним графіком відбору зміщення (офсету). Якщо середовище зайняте, сенсорний вузол продовжує прослуховувати до тих пір, поки середовище не перейде в режим очікування або до отримання кадру даних. Розмір преамбули дорівнює періоду відбору, що гарантує активність приймача для отримання частини даних пакета. Такий підхід дозволяє обмеженим в енергії сенсорним вузлам вимикати їх радіо, коли канал перебуває в режимі очікування, без ризику пропустити пакет. Недоліком цього підходу є те, що розмір преамбули впливає на досяжну пропускну здатність і те, що пристрої повинні залишатися активними, коли виявлять преамбулу, навіть якщо вони не є ймовірним наступником.

WiseMAC покращує це шляхом додавання методу, який дозволяє базовій станції дізнатися порівняльний графік пункту призначення, тим самим дозволяючи їй почати передачу преамбули безпосередньо перед пробудженням приймача. Це дозволяє базовій станції зменшити розмір преамбули, як показано на правому графіку на Рис. 3.4. Крім того, оскільки частина даних пакета почне передаватися відразу після включення радіоприймача, час активності приймача також скорочується. Графік зміщення вузла вбудовується в підтвердження

(ASK), що дозволяє базовій станції дізнатися графік відбору. Тривалість преамбули (T_p) визначається як мінімум періоду відбору (T_w) і декількох часових відхилень між годинами в базовій станції і приймачі, які ростуть з плином часу. Таким чином, довжина преамбули залежить від завантаженості трафіку: преамбула більш коротка при високому трафіку (короткі проміжки між двома послідовними зв'язками) і більше при низькому завантаженні.

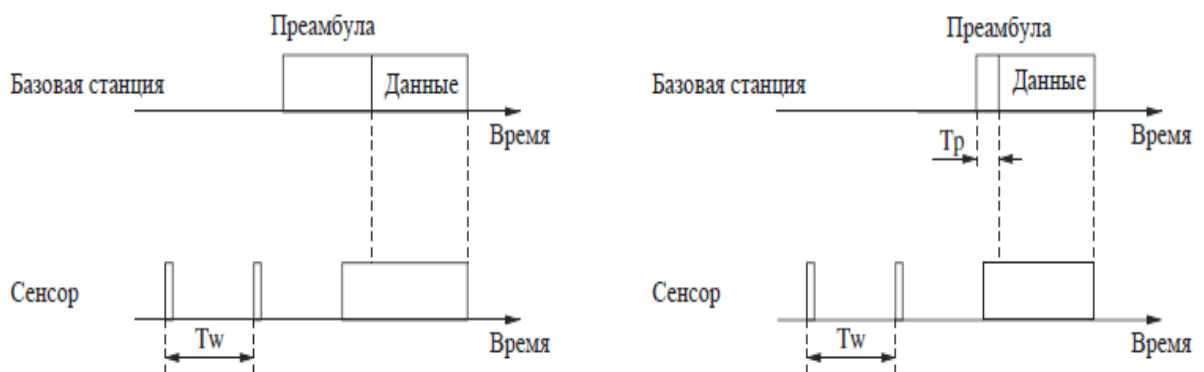


Рисунок 3.4. Відбір преамбули в WiseMAC

У підсумку, WiseMAC впроваджує енергоефективні графіки сну / активності для сенсорних вузлів, забезпечуючи при цьому те, що всі передачі даних від базової станції до датчиків будуть отримані (приймач буде активним). Проте, такий підхід неефективний для широкомовних повідомлень, так як розмір преамбули, ймовірно, буде дуже великим, вона повинна охоплювати більше точок відбору всіх передавальних пристроїв. Нарешті, на WiseMAC також впливає проблема прихованої станції, тобто, преамбула відправника може перешкодити поточним передачам, коли відправник не обізнаний про цю другу передачу.

Серед неконкурентних MAC протоколів розглянемо DEE-MAC - (Dynamic Energy Efficient).

Використання TDMA в протоколах MAC розглядається вже ж таки як більш основний для БСМ, оскільки радіо можуть бути вимкнені під час простою, щоб зберегти енергію. До того ж можна об'єднувати кластеризаційні рішення з MAC протоколами на базі TDMA, щоб зменшити витрати на прослуховування у

режимі очікуванні. Робота в DEE-MAC ділиться на раунди, як у системі LEACH [10]. Раунд - це тривалість часу між вузлом (наприклад, вузол приймача), що поширює свій інтерес до події та отримує відповідь від події. Кожен раунд складається з фази формування кластера та фази передачі (Рисунок 3.5.).

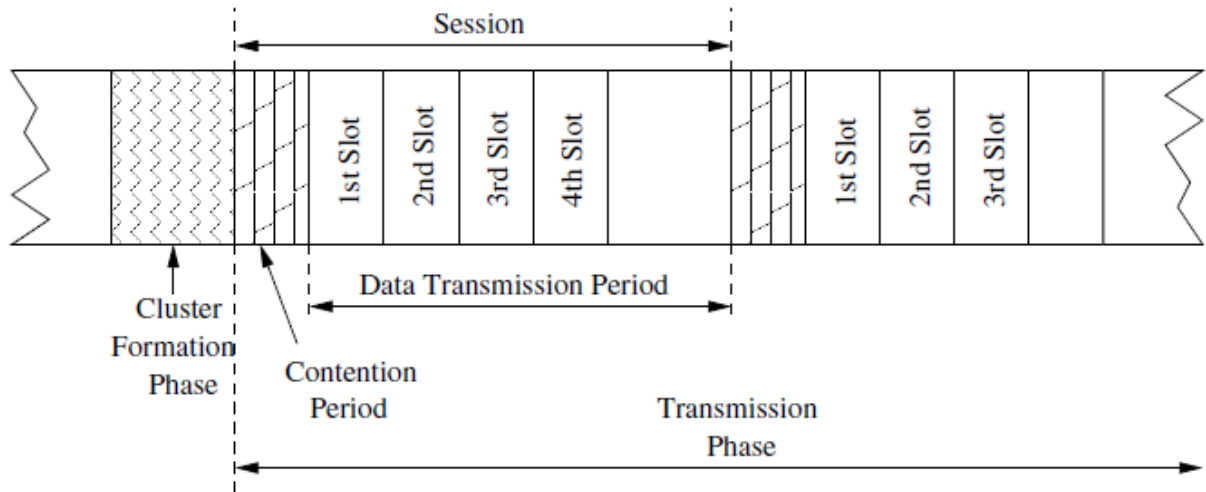


Рисунок 3.5. Раунд в DEE-MAC

Іншими словами, операції DEE-MAC складаються з цих двох фаз. Кожен з етапів включає фазу формування кластера та фазу передачі. У фазі формування кластера вузол вирішує, хто буде кластерною головою на основі залишкової потужності. Вузол з найвищим рівнем потужності обирається як кластерна голова. Кожен новий раунд починає формування іншого кластера з іншою групою вузлів на основі поточного потужності вузла та змін мережевої структури. Після успішного вибору головного кластера система входить у фазу передачі. Цей етап складається з кількох сеансів, і кожна сесія складається з періоду конфлікту (contention period - CP) та періоду передачі даних. Протягом CP вузли повинні відправити (interest to send packets - IS) пакети до кластерної голови. Після цього періоду кластерна голова знає, який із вузлів має дані для передачі. Кластерна голова створює розклад TDMA, який транслюється для всіх вузлів в кластері. Для кожного вузла виділений один слот даних в кожному сеансі. На основі переданого графіка кожний з вузлів, що мають дані для

прийому або відправлення, прокидається. Якщо вузол немає даних, щоб відправити, то він може бути вимкненим (Рисунок 3.6.).

1st Slot	2nd Slot	3th Slot	4th Slot	5th Slot
<ul style="list-style-type: none"> • Data from cluster-head broadcasted • Following schedule broadcasted: <ul style="list-style-type: none"> – node1 unicasts node2 in 2nd slot – node2 broadcasts in 3rd slot – node3 unicasts node2 in 4th slot – node4 unicasts node3 in 5th slot 	<ul style="list-style-type: none"> • node1 (on) • node2 (on) • node3 (off) • node4 (off) 	<ul style="list-style-type: none"> • node1 (on) • node2 (on) • node3 (on) • node4 (on) 	<ul style="list-style-type: none"> • node1 (off) • node2 (on) • node3 (on) • node4 (off) 	<ul style="list-style-type: none"> • node1 (off) • node2 (off) • node3 (on) • node4 (on)

Рисунок 3.6. Приклад періоду передачі даних в DEE-MAC

Кластеризовані та схеми, основані на TDMA, є раціональним рішенням для зниження вартості прослуховування великих за масштабом безпроводових сенсорних мережах. Додаткове підвищення енергоефективності може бути отримано шляхом аналізу можливості помилки в пакеті в період суперечки та шляхом використання міжкластерний зв'язок через вузли, а не тільки через кластерні голови.

Серед гібридних MAC протоколів розглянемо Z-MAC.

Z-MAC (ZebraMAC) [20] протокол, використовує кадри і інтервали, на зразок TDMA протоколів, щоб забезпечити неконкурентний доступ до безпроводової середовищі. Однак, Z-MAC також дозволяє вузлам використовувати інтервали якими вони не володіють, використовую CSMA з пріоритетним часом відстрочки. Як наслідок, Z-MAC емулює CSMA підхід у випадках низького трафіку і TDMA підхід, у випадках високого.

Коли вузол запускається, він вступає в фазу установки, що дозволяє йому виявити своїх сусідів і отримати свій інтервал в TDMA кадрі. Кожен вузол, періодично, транслює повідомлення містить список своїх сусідів. В рамках цього процесу вузол дізнається про своїх одно і двох-скачкових сусідів. Ця інформація використовується як вхідні дані в протоколі розподілу інтервалів призначення, який забезпечує кожен вузол часовим інтервалом, забезпечуючи графік, де двом

вузлам в двох-скачковому оточенні не виділять один і той же інтервал. Крім того, Z-МАС дозволяє вузлам вибирати періодичність їх виділених інтервалів, де різні вузли можуть мати різні періоди, які називаються тимчасові кадри (TF). Перевага цього підходу полягає в тому, що немає необхідності поширювати максимальну кількість інтервалів (MSN) по всій мережі, і що протокол може локально адаптувати призначення інтервалів. Зокрема, якщо вузлу i призначається інтервал s_i і $F_i \in \text{MSN}$ в двох-скачковому оточенні вузла, то TF вузла i встановлюється рівним 2^a , де a це позитивне ціле число, яке задовольняє $2^{a-1} \leq F_i < 2^a$. Вузол i потім використовує s_i інтервал кожні 2^a тимчасових кадрів. Рисунок 3.7 ілюструє приклад з вісьма вузлами, де число вказує виділений інтервал для кожного вузла, а число в дужках це F_i . Нижня частина малюнка показує відповідний графік для всіх вузлів, де світлі інтервали використовуються для передач, а темні інтервали це порожні інтервали, які не використовуються жодним одно або двох-скачковим сусідом. Якщо використовується глобальний тимчасовий кадр, вибраний часовий кадр буде b і вузлам А і В буде дозволено використовувати свої інтервали тільки один раз кожні b інтервалів (хоча розмір їх кадру дорівнює 2). Проте, в Z-МАС вони можуть використовувати розмір кадру 4, що підвищує паралелізм у використанні каналу і зменшує затримки повідомлень. Отриманий графік показує, що деякі інтервали (зокрема інтервали 6 і 7) не призначені ні одного вузла. У глобальному тимчасовому кадрі, розмір кадру може бути обраний, що зменшує кількість порожніх інтервалів. Проте, Z-МАС дозволяє вузлам конкурувати за ці «додаткові» інтервали, використовуючи CSMA.

Після того, як буде визначено графік, кожен вузол передає розмір свого кадру і номер інтервалу своїм одно і двох-скачковими сусідам. Незважаючи на те, що інтервали належать вузлам, Z-МАС використовує CSMA для визначення того, хто може передати. Проте, власникам інтервалів віддається перевага, шляхом використання випадкового значення відстрочки з діапазону $[0, T_o]$, тоді як інші вузли вибирають своє значення відстрочки з діапазону $[T_o, T_{no}]$. Z-МАС

також використовує явне повідомлення про конкуренцію (ECN), де ґрунтуючись на локальній оцінці рівня конкуренції (наприклад, він визначається з використанням коефіцієнта втрати пакетів або рівня шуму в каналі), де кожен вузол вирішує, чи слід відправляти ECN повідомлення сусідові, для якого у нього є повідомлення. Ці сусіди, потім, транслюють ECN своїм сусідам, які, потім, переходять в режим високого рівня конкуренції (HCL). У HCL режимі вузол передає дані тільки в свої інтервали або інтервали, що належать його односкачковим сусідам, зменшуючи конкуренцію між двох-скачкова сусідами. Вузол знаходиться в HCL режимі, повертається в режим низького рівня конкуренції (LCL), якщо протягом певного часу не отримує ніяких ECN повідомлень.

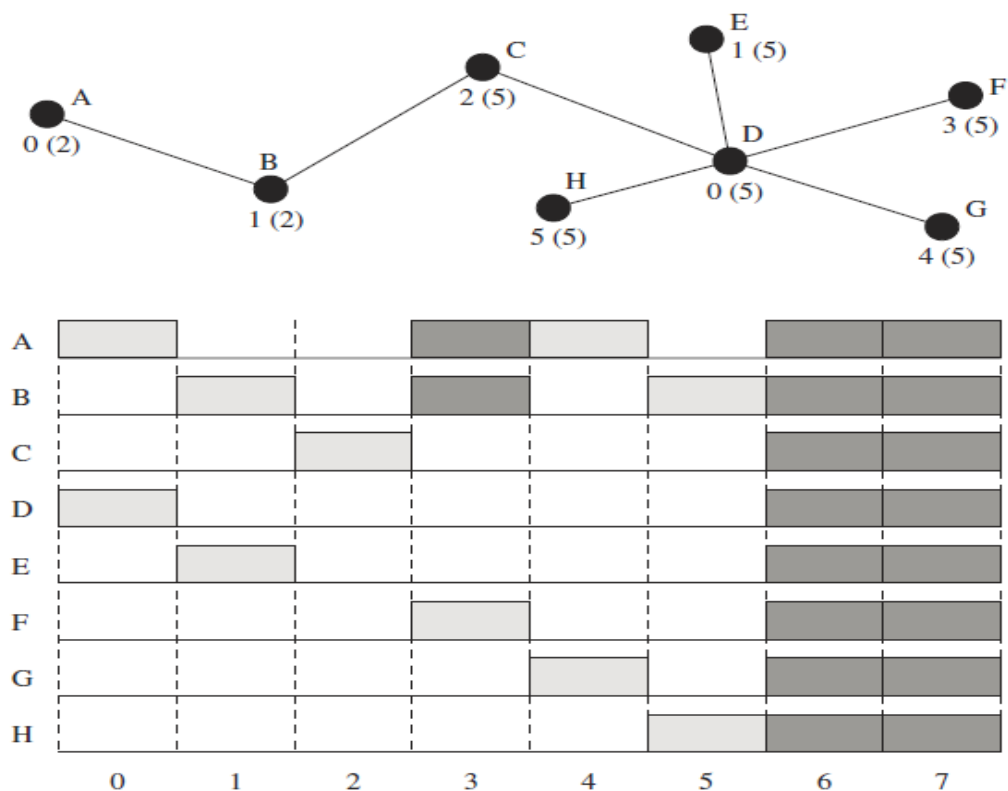


Рисунок 3.7. Вибір часових інтервалів у відповідний розклад для Z-MAC мережі

У підсумку, Z-MAC застосовує властивості, знайдені в TDMA і CSMA протоколах, що дозволяє швидко адаптуватися до змін умов трафіку. При легкому навантаженні на трафік, Z-MAC поводить себе скоріше як CSMA, в той час

як при важкому навантаженні на трафік конкуренція за інтервали зменшується. Z-MAC вимагає явної фази установки, яка витрачає час і енергію. У той час, як ESN повідомлення може бути використані для локального зменшення конкуренції, ці повідомлення додадуть трафік в уже завантажену мережу і їм знадобиться час на поширення, викликаючи підвищення затримок в адаптації.

3.2. Детальний опис і оцінка енергоефективності кластерного протокола маршрутизації.

Розглянемо ієрархічні протоколи маршрутизації, такі як: LEACH. Безліч сенсорів в ієрархічних протоколах ділиться на кластери (Рисунок 3.8.). Кожним кластером керує спеціальний вузол, званий головним кластерним вузлом (ГКВ), який відповідає за координування передачі і маршрутизацію даних в своєму кластері, а також до базових станцій. Об'єднання в кластери дозволяє продовжити життя БСМ.

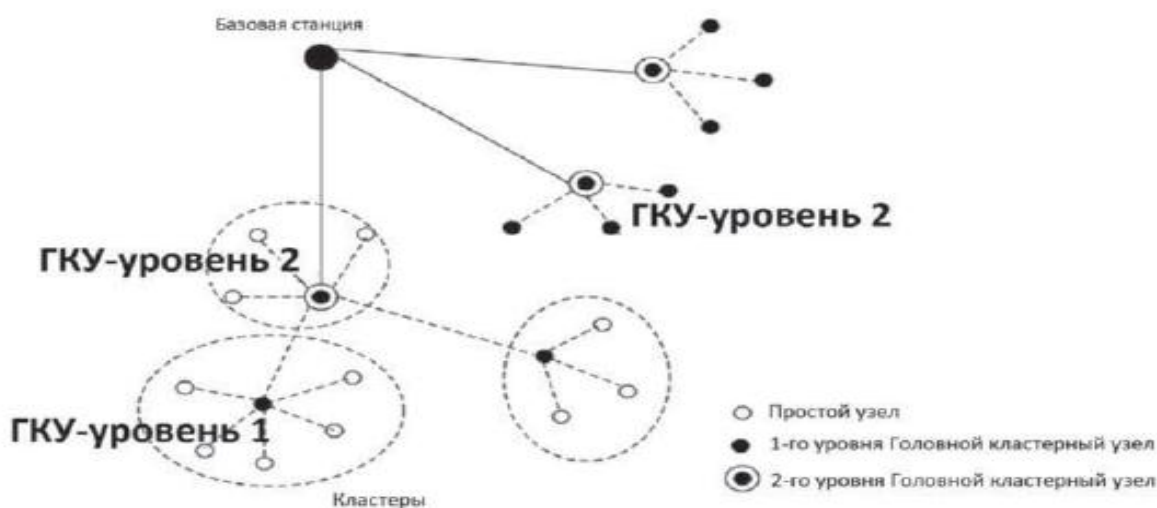


Рисунок 3.8. Ієрархічна модуль створена на кластерах

LEACH (Low energy adaptive clustering hierarchy - Адаптивна Ієрархічна Кластеризація з низьким споживанням енергії) - це протокол, який поєднує в собі неконкурентний зв'язок в TDMA стилі з алгоритмом кластеризації для БСМ. Кластер складається з єдиною головки кластера і будь-якої кількості учасників

кластера, які взаємодіють тільки з головою кластера [21]. Кластеризація є популярним підходом в БСМ, так як вона сприяє агрегації і обробці даних в мережі в кластерній голівці, для скорочення обсягу даних які необхідно передати на базову станцію (Рисунок 3.9).

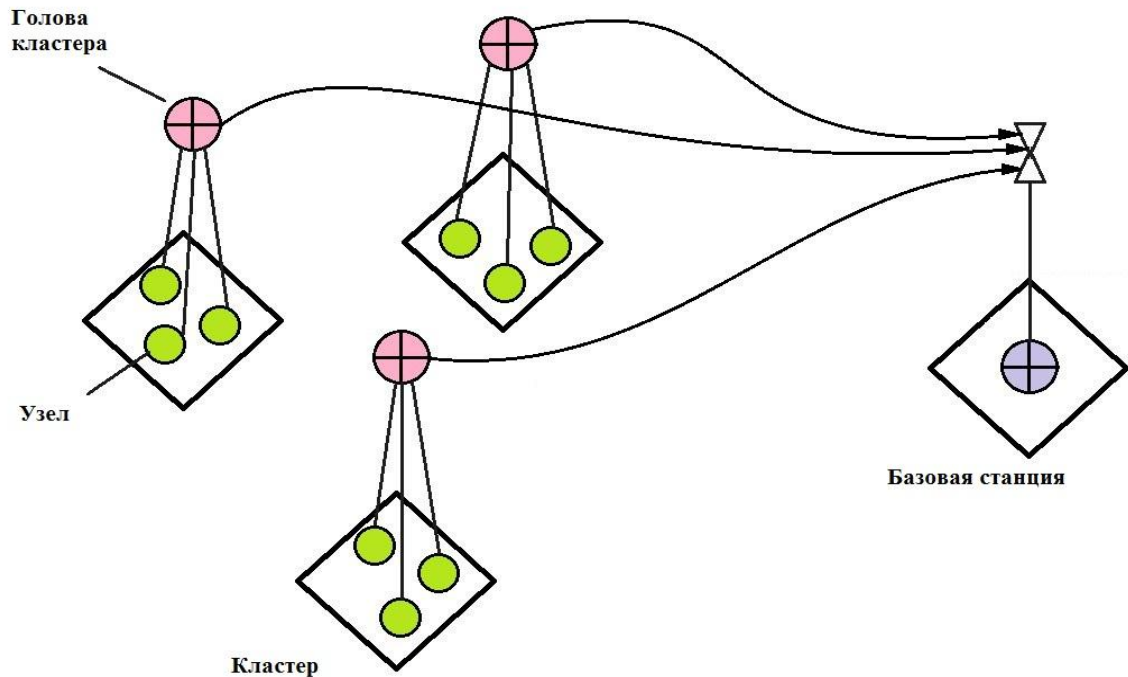


Рисунок 3.9. Кластерне формування вузлів в LEACH

LEACH функціонує за допомогою раундів, що складаються з двох фаз: фази установки і статичної фази(Рисунок 3.10.).

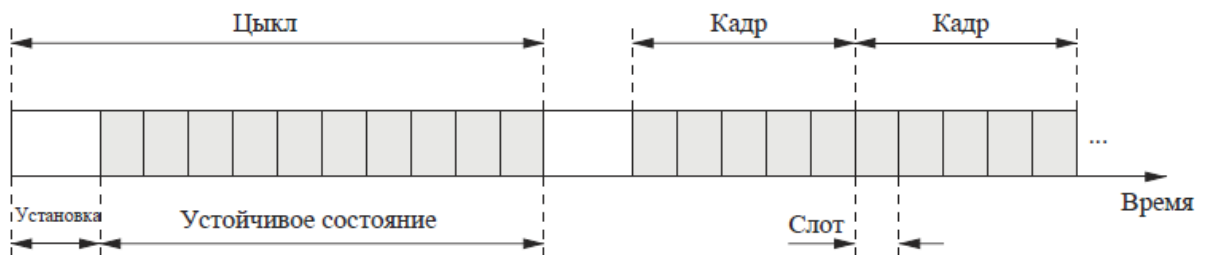


Рисунок 3.10. Структура керуючої частини і передачі даних в протоколі LEACH

Тепер розглянемо більш детально ці дві фази. Під час фази установки визначаються кластерні голівки, і встановлюється графік зв'язку в кожному кластері. Оскільки кластерні голівки відповідають за координацію діяльності кластера та відправку даних на базову станцію, його енергопотребі, будуть

значно вище, ніж у інших сенсорних вузлів. Таким чином, LEACH чергує обов'язки кластерних головок між сенсорними вузлами, щоб рівномірно розподілити енергонавантаження. Зокрема, на початку раунду, кожен вузол i вибирає себе кластерної головою з певною ймовірністю $P_i(t)$. У мережі з кількістю вузлів N і бажаним кількістю кластерних головок k , ймовірності можуть бути обрані так:

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = k \quad (3.1)$$

Існують різні підходи для вибору $P_i(t)$, наприклад:

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * (r \bmod \frac{N}{k})}, & C_i(t) = 1; \\ 0, & C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Цей підхід використовує індикаторну функцію $C_i(t)$ для визначення, чи був вузол i кластерної головою в $r_{\text{mod}}(N/k)$ в попередніх раундах. Тільки вузли, які недавно не були кластерними головками підходять для ролі виконання кластерної головки. Такий спосіб вибору кластерних головок спрямований на рівномірний розподіл відповідальності кластерних головок, і, отже, енергетичних накладних витрат між усіма сенсорними вузлами. Однак, до уваги береться фактична кількість енергії доступне кожному вузлу. Тому можна використовувати альтернативний підхід до визначення ймовірності стати кластерної головою:

$$P_i(t) = \min \left\{ \frac{E_i(t)}{E_{\text{total}}(t)} k, 1 \right\}, \quad (3.3)$$

де $E_i(t)$ - поточне енергоспоживання вузла i ;

$E_{\text{total}}(t)$ - сума рівня енергії всіх вузлів.

Одним з недоліків цього підходу є те, що кожен вузол повинен знати (або підраховувати) $E_{\text{total}}(t)$.

Після того, як вузол визначить, що він буде виконувати функції головки кластера в наступному раунді, він інформує інші сенсорні вузли про свій новий статус передаючи анонс-повідомлення (ADV) використовуючи нестійкий CSMA протокол. Кожен сенсорний вузол приєднується до кластеру шляхом вибору

кластерної головки, що може бути досягнуто з найменшою кількістю передачі енергії (ґрунтуючись на інтенсивності сигналу анонс-повідомлень від кластерної головки), а також відправкою повідомлення про приєднання (Join-REQ) голівці кластера (знову ж таки, використовуючи CSMA). Кластерна головка створює графік передачі для свого кластера і передає цей графік кожного вузла свого кластера.

Далі опишемо роботу статичної фази. Сенсорний вузол взаємодіє тільки з кластерною голівкою і може передавати дані тільки протягом інтервалів, встановлених графіком, який він отримав від кластерної головки. Відповідальністю кластерної головки є передача сенсорних даних створюваних сенсорними вузлами її кластера на базову станцію. Щоб зберегти енергію, кожен учасник кластера використовує мінімальну потужність передачі до кластерної голівці, і вимикає безпроводовий зв'язок між призначеними йому інтервалами. З іншого боку, кластерна головка повинна бути постійно активної, щоб отримувати сенсорні дані від учасників свого кластера і відправляти їх базовій станції. У той час, як внутрішньо-кластерна зв'язок здійснюється в неконкурентній TDMA з використання кадрів і слотів, зв'язок відбувається в одному кластері, все ще може перешкоджати зв'язку в іншому кластері. Таким чином, сенсорні вузли використовують метод прямої послідовності для розширення спектра (DSSS), для обмеження перешкод між кластерами, тобто кожен кластер використовує розширення послідовності, що відрізняється від розширення послідовності використовуваної в сусідньому кластері. Інша зарезервована послідовність використовується для зв'язку між кластерною голівкою і базовою станцією. Зв'язок між кластерною голівкою і базовою станцією ґрунтується на цьому фіксованому коді і CSMA. Перед відправкою даних, кластерна головка слухає канал, щоб визначити чи використовується такий же код розширення зараз.

Різновид цього протоколу, LEACH-C протокол, визначення кластерної головки покладає на базову станцію. Це відбувається під час фази установки,

коли сенсорні вузли відправляють дані про своє місцезнаходження і енергетичному рівні на базову станцію. На основі цієї інформації базова станція визначає кластерні головки і повідомляє їм про їх нові ролі. Інші сенсорні вузли, потім, можуть приєднатися до кластеру, використовуючи повідомлення про приєднання, як описано для оригінального LEACH протоколу.

Таким чином, LEACH використовує різні методи для зменшення енергоспоживання (мінімальна потужність передачі, уникнення прослуховування при простої учасників кластера) і досягнення неконкурентною зв'язку (зв'язок заснована на графіку, DSSS). У той час як всередині-кластерна зв'язок неконкурентна, а перешкоди між кластерами усунені, зв'язок між кластерної головою і базовою станцією і раніше ґрунтується на CSMA. Крім того, LEACH передбачає можливість всім вузлам досягти базової станції, яка впливає на масштабованість даного протоколу. Проте, то можна вирішити шляхом або додавання мульти-скачкової підтримки маршрутизації між базовою станцією і всіма кластерними головками, або, шляхом реалізації ієрархічного кластерного підходу, при якому деякі кластерні головки відповідають за збір даних від інших кластерних головок.

Переваги LEACH протоколу:

- використання адаптивного самоорганізованого протоколу дозволяє розподілити енергетичне навантаження по всій мережі;
- перша «смерть» вузла відбувається у вісім разів пізніше, ніж при використанні прямої передачі і статичних кластерних протоколів.
- дозволяє проводити обробку даних на голові кластера, що може зменшити кількість даних, що передаються по мережі;
- оптимальна кількість кластерів може бути визначена заздалегідь залежно від топології мережі та відношення затрат на обробку/передачу інформації.

3.3. Математичне моделювання вдосконаленого енергоефективного протоколу маршрутизації LEACH

Пропозиція, щодо модифікації LEACH протоколу.

Як було описано вище LEACH протокол складається з кластерних голів і звичайних датчиків. Робота виконується раундами, де кожен раунд починається з фази встановлення, коли організуються кластери, а потім стаціонарний етап, коли відбувається передача даних на базову станцію. На етапі встановлення кожен вузол вирішує чи буде він головою кластера. Голова кластера вибирається з випадковою ймовірністю і наступного раунду датчик який був КГ вже не може виконувати функції КГ, а знову випадково вибирається з звичайних датчиків. Кожен датчик підключається до якомога ближчої КГ для більшої економії енергії. Але в даного методу одним з недоліком являється те, що при виборі КГ вони можуть більше бути зосереджені в одній частині мережі, а в результаті цього звичайні датчики повинні будуть передавати дані до КГ на набагато більшу дистанцію, ніж те було потрібно. Отже тому, ми хочемо запропонувати більш вдосконалений підхід - D-LEACH протокол. D-LEACH (Divide LEACH) гарантує, що обрані кластерні голови будуть однорідно розподілені по мережі. Отже не буде випадку, коли кластерні голови будуть зосереджені в одній частині мережі. Продуктивність запропонованого D-LEACH протоколу оцінена головним чином згідно наступних метрик:

- a) Середнє споживання енергії - середня енергія, що витрачається датчиками, вимірюється в однаковими інтервалами;
- b) Середня пропускна здатність – середня кількість пакетів отримано на приймачі;
- c) Час життя мережі – загальна кількість вузлів, які живі в кінці всіх раундів(циклів).

Запропонований алгоритм D-LEACH протоколу: D-LEACH використовує розподілений підхід кластеризації, як і LEACH. Поле мережі розділене на однакові під регіони. Вибір кластерної голови виконується сходом підходом, як в LEACH, але в кожному під регіоні.

Вихідні дані

N – загальна кількість датчиків

W – ширина мережі в метрах

L – довжина мережі в метрах

P – кількість КГ у відсотках відносно загальної кількості датчиків

num_rounds – максимальна кількість раундів під час моделювання

E_i – початкова енергія кожного вузла в джоулях

E_{trans} – кількість енергії яка витрачається на передачу 1 біта інформації

E_{rec} – кількість енергії яка витрачається на прийом 1 біта інформації

E_{agg} – кількість енергії яка витрачається на агрегацію даних

CH_{pl} – розмір пакету для КГ в бітах за 1 раунд

$NonCH_{pl}$ – розмір пакету для нормального датчика за 1 раунд

T_{setup} – середній час в секундах, який надається для фази установки

T_{ss} – середній час в секундах, який надається для статичної фази

$SX = W/2$; $SY = L/2$ – координати розташування БС

Постановка задачі:

Виконаємо математичне модулювання LEACH і D-LEACH протоколів в програмі Matlab та виконаємо порівняння по вказаним вище метрикам. Один і

той самий експеримент будемо виконувати декілька разів для отримання більш точних та узагальнених результатів.

- $N = 200$;
- $W = 1000$;
- $L = 1000$;
- $p = 0.1$;
- $\text{num_rounds} = 200$;
- $E_i = 2$;
- $E_{\text{trans}} = 1 \times 10^{-7}$;
- $E_{\text{rec}} = 1 \times 10^{-7}$;
- $E_{\text{agg}} = 1 \times 10^{-8}$;
- $E_{\text{fs}} = 0.34 \times 10^{-9}$;
- $\text{CHpl} = 6400$;
- $\text{NonCHpl} = 200$;
- $T_{\text{setup}} = 4$;
- $T_{\text{ss}} = 10$;
- $SX = W/2$; $SY = L/2$;

Виконуємо побудову БСМ

- 1) 1й рядок: стан КГ-1: ніколи не був КГ, 0: був КГ , 2й рядок: x-позиція, 3й: y-позиція

$$\text{net} = [\text{ones}(1,N); \text{rand}([1,N])*W; \text{rand}([1,N])*L];$$

Спочатку побудуємо та змоделюємо вище описані метрики для LEACH протокола.

- 2) Пререлокація для вирахування енергії

$E = E_i * \text{ones}(1, N)$; - кількість енергії яка залишилася

$E_H = \text{zeros}(1, \text{num_rounds})$;

3) Преаллокація для вирахування «мертвих» датчиків

$E_{crit} = 0$; - критична енергія, яка залишилася в датчику, щоб рахувався робочим

$N_{crit} = \text{fix}((95/100)*N)$; - критична кількість «мертвих» датчиків, яка рахується для припинення виконання обчислень програмою Matlab

$Dead = \text{false}(1, N)$; - статус датчиків, де 0 – Робочий, 1 - «мертвий»

$Dead_H = \text{zeros}(1, \text{num_rounds})$;

4) Преаллокація для розрахунків відправлених бітів

$Bits_H = \text{zeros}(1, \text{num_rounds})$;

$\text{figure}('Position', [34 \ 30 \ 792 \ 613])$;

5) Симуляції кожного раунду

for $r=1:\text{num_rounds}$ – ітерація для симуляції раундів

6) Вибір КГ

$[\text{net}(1,:), CH] = \text{UpdateCH}(\text{net}(1,:), Dead, p, r)$;

7) Обрахунок енергії

$E_H(r) = \text{sum}(E)$; - отримує суму всієї енергії, яка залишилася на датчику

8) Обрахуємо кількість енергії КГ

$\text{numClust} = \text{length}(\text{find}(CH))$;

$D = \text{sqrt}((\text{net}(2, CH) - SX).^2 + (\text{net}(3, CH) - SY).^2)$;

$$E(CH) = E(CH) - (((E_{trans} + E_{agg}) * CH_{pl}) + (E_{fs} * CH_{pl} * (D.^2)) + (NonCH_{pl} * E_{rec} * \text{round}(N/\text{numClust})));$$

9) Кількість енергії решти датчиків

$$\text{rest} = N - \text{numClust} - \text{sum}(\text{double}(\text{Dead}));$$

$$mD = \text{zeros}(1, \text{rest}); \text{tmp} = \text{net}(2:3, \sim CH \& \sim \text{Dead});$$

$$\text{for } i=1:\text{rest}, mD(i) = \text{fun}(\text{tmp}(1,i), \text{tmp}(2,i), \text{net}, CH, SX, SY); \text{end}$$

$$E(\sim CH \& \sim \text{Dead}) = E(\sim CH \& \sim \text{Dead}) - ((NonCH_{pl} * E_{trans}) + (E_{fs} * CH_{pl} * (mD.^2)) + ((E_{rec} + E_{agg}) * CH_{pl}));$$

10) Оновлення статусу на робочий для всіх датчиків

$$E(\text{Dead}) = 0;$$

$$\text{Dead}(E \leq E_{crit}) = \text{true}; \text{DeadH}(r) = \text{sum}(\text{double}(\text{Dead}));$$

11) Передача даних в бітах

$$\text{BitsH}(r+1) = \text{BitsH}(r) + \text{numClust} * CH_{pl} + \text{rest} * NonCH_{pl};$$

12) Графічне зображення виконання дії коду

$$\text{net} = \text{DrawNet}(\text{net}, N, CH, \text{Dead}, SX, SY);$$

$$\text{title}([\text{'Звичайні датчики: Чорні ---- КГ:Червоні ---- "Мерті":пусті круги --'} \\ \text{' - раунд (' , num2str(r), ')}]);$$

drawnow

if $\text{DeadH}(r) \geq N_{crit}$, break; end – припинення симуляції, коли кількість робочих датчиків менша 5 відсотків

end

close all

$$T = (T_{\text{setup}} + T_{\text{ss}}) * (0:r-1);$$

$$EH = EH(1:r); EH_{\text{dis}} = (N * E_i) - EH;$$

$$\text{DeadH} = \text{DeadH}(1:r); \text{AliveH} = N - \text{DeadH};$$

$$\text{BitsH} = \text{BitsH}(2:r+1);$$

Далі виконаємо практично ті самі дії для нашого D-LEACH протоколу

$$\text{net} = [\text{ones}(1,N); \text{net}(2:3,:)];$$

13) Преалокція для вирахування енергії

$$E = E_i * \text{ones}(1,N);$$
 - кількість енергії яка залишилася

$$EH = \text{zeros}(1, \text{num_rounds});$$

14) Преалокція для вирахування «мертвих» датчиків

$E_{\text{crit}} = 0;$ - критична енергія, яка залишилася в датчику, щоб рахувався робочим

$N_{\text{crit}} = \text{fix}((95/100) * N);$ - критична кількість «мертвих» датчиків, яка рахується для припинення виконання обчислень програмою Matlab

$$\text{Dead} = \text{false}(1,N);$$
 - статус датчиків:

- 0:Робочий
- 1: «мертвий»

$$\text{DeadH} = \text{zeros}(1, \text{num_rounds});$$

15) Преалокція для розрахунків відправлених бітів

$$I\text{BitsH} = \text{zeros}(1, \text{num_rounds});$$

$$\text{figure}('Position', [34 30 792 613]);$$

16) Симуляції кожного раунду

for r=1:num_rounds - ітерація для симуляції раундів

17) Вибір КГ

[net(1,:),CH] = UpdateCHi(net,net(1,:),Dead,W,L,N,p,r);

18) Обрахунок енергії

$E_H(r) = \text{sum}(E)$; - отримує суму всієї енергії, яка залишилася на датчику

19) Обраховуємо кількість енергії КГ

numClust = length(find(CH));

$D = \text{sqrt}((\text{net}(2,CH) - SX).^2 + (\text{net}(3,CH) - SY).^2)$;

$E(CH) = E(CH) - (((E_{\text{trans}} + E_{\text{agg}}) * CH_{\text{pl}}) + (E_{\text{fs}} * CH_{\text{pl}} * (D.^2)) + (NonCH_{\text{pl}} * E_{\text{rec}} * \text{round}(N/\text{numClust})))$;

20) Кількість енергії решти датчиків

rest = N-numClust-sum(double(Dead));

mD = zeros(1,rest); tmp = net(2:3,~CH&~Dead);

for i=1:rest, mD(i) = fun(tmp(1,i),tmp(2,i),net,CH,SX,SY); end

$E(\sim CH \& \sim Dead) = E(\sim CH \& \sim Dead) - ((NonCH_{\text{pl}} * E_{\text{trans}}) + (E_{\text{fs}} * CH_{\text{pl}} * (mD.^2)) + ((E_{\text{rec}} + E_{\text{agg}}) * CH_{\text{pl}}))$;

21) Оновлення статусу на робочий для всіх датчиків

$E(Dead) = 0$;

Dead($E \leq E_{\text{crit}}$) = true ; DeadH(r)=sum(double(Dead));

22) Передача даних в бітах

$IBitsH(r+1) = IBitsH(r) + \text{numClust} * CH_{\text{pl}} + \text{rest} * NonCH_{\text{pl}}$;

23) Графічне зображення виконання дії коду


```

net = DrawNet(net,N,CH,Dead,SX,SY);

title(['Звичайні датчики:Чорні ---- КГ:Червоні ---- "Мерті":пусті круги -
-- раунд (' ,num2str(r),'')]);

drawnow

if DeadH(r)>=Ncrit,break;end - припинення симуляції, коли кількість
робочих датчиків менша 5 відсотків

end

close all

```

$$IT = (Tsetup+Tss)*(0:r-1);$$

$$EH = EH(1:r); IEHdis = (N*Ei)-EH;$$

$$DeadH = DeadH(1:r); IAliveH = N-DeadH;$$

$$IBitsH = IBitsH(2:r+1);$$

24) Зображення вище вказаних метрик для LEACH і D-LEACH протоколів

```

figure('Position',[131 59 792 613]);

plot(T,EHdis,'-x',IT,IEHdis,'-x');

xlabel('Час (с)'); ylabel('Енергія (дж)')

title('Сумарна затрачена енергія')

legend('LEACH','D-LEACH')

figure('Position',[298 66 792 613]);

plot(T,AliveH,'-x',IT,IAliveH,'-x');

xlabel('Час (с)'); ylabel('Кількість працюючих датчиків')

title('Час життя датчиків')

```

```

legend('LEACH',"D-LEACH")

figure('Position',[511 61 792 613]);

plot(T,BitsH,'-x',IT,IBitsH,'-x');

xlabel('Чвс (с)'); ylabel('Пропускна спроможність (немає пакетів)')

title(['Пропускна спроможність (' num2str(N) ' Датчиків')])

legend('LEACH',"D-LEACH")

```

Для графічного відображення коду використовується **net** функція

```
function net = DrawNet(net,N,CH,D,SX,SY)
```

1) Зображення нормальних датчиків

```

plot(net(2,~CH&~D),net(3,~CH&~D),'ko','MarkerSize',...
      5,'MarkerFaceColor','k'); hold on;

```

2) «Мертвих» датчиків

```
plot(net(2,D),net(3,D),'ko','MarkerSize',5);
```

3) Кластерних голів

```

plot(net(2,CH),net(3,CH),'ko','MarkerSize',...
      7,'MarkerFaceColor','r');

```

4) Базової станції

```

scatter(SX,SY,100,'bo','filled')

text(SX+2,SY+2,'BC','FontSize',10,'VerticalAlignment','Baseline');

```

5) Вісь абсцис і ординат

```
s = int2str((1:N));
```

```

text(net(2,:)+1,net(3,:)+1,s,'FontSize',8,'VerticalAlignment','Baseline');

xlabel('\it x \rm [M] \rightarrow');
ylabel('\it y \rm [M] \rightarrow');

hold off

```

За оновлення КГ LEACH протокола відповідає функція **UpdateCH**

```

function [G,CH] = UpdateCH(G,D,p,r)

tmp = rand(size(G)); - вибір випадкового номера для кожного датчика

T = G;

idx = T==1;

if isempty(find(idx, 1))

    G = ones(size(G));

    idx = G==1;

end

T(idx) = p / (1-p * mod(r, round(1 / p)));

T(~idx) = 0;

T(D) = 0;

CH = tmp<T;

G(CH) = 0;

```

За оновлення КГ D-LEACH протокола відповідає функція **UpdateCHi**

```

function [G,CHi] = UpdateCHi(net,G,D,W,L,N,p,r)

```

- Розділення площі мережі на під регіони

```

numRx = fix(sqrt(p*N)); - кількість сегментів на кожній стороні

```

```

dx = W/numRx; dy = L/numRx;
X = net(2,:); Y = net(3,:);
CHi= false(size(G));
for i=1:numRx
    for j=1:numRx
        idx = ((X>(j-1)*dx)&(X<j*dx))&((Y>(i-1)*dy)&(Y<i*dy))&(~D);
        CHi(idx) = circshift([true,false(1,sum(double(idx))-1)],r,2);
    end
end
G(CHi) = 0;

```

Далі приведемо рисунки та графіки нашого моделювання. На рисунку 3.11, можна побачити в чому полягає недолік LEACH протоколу. Під час моделювання під час будь-якого раунду(в нашому випадку це 9-й) можна побачити, що є така й ймовірність коли найближча КГ розташована не в найближчій частині мережі, як результат звичайні датчики повинні передавати дані до найближчої КГ на більшу відстань, що означає більшу витрату енергії.

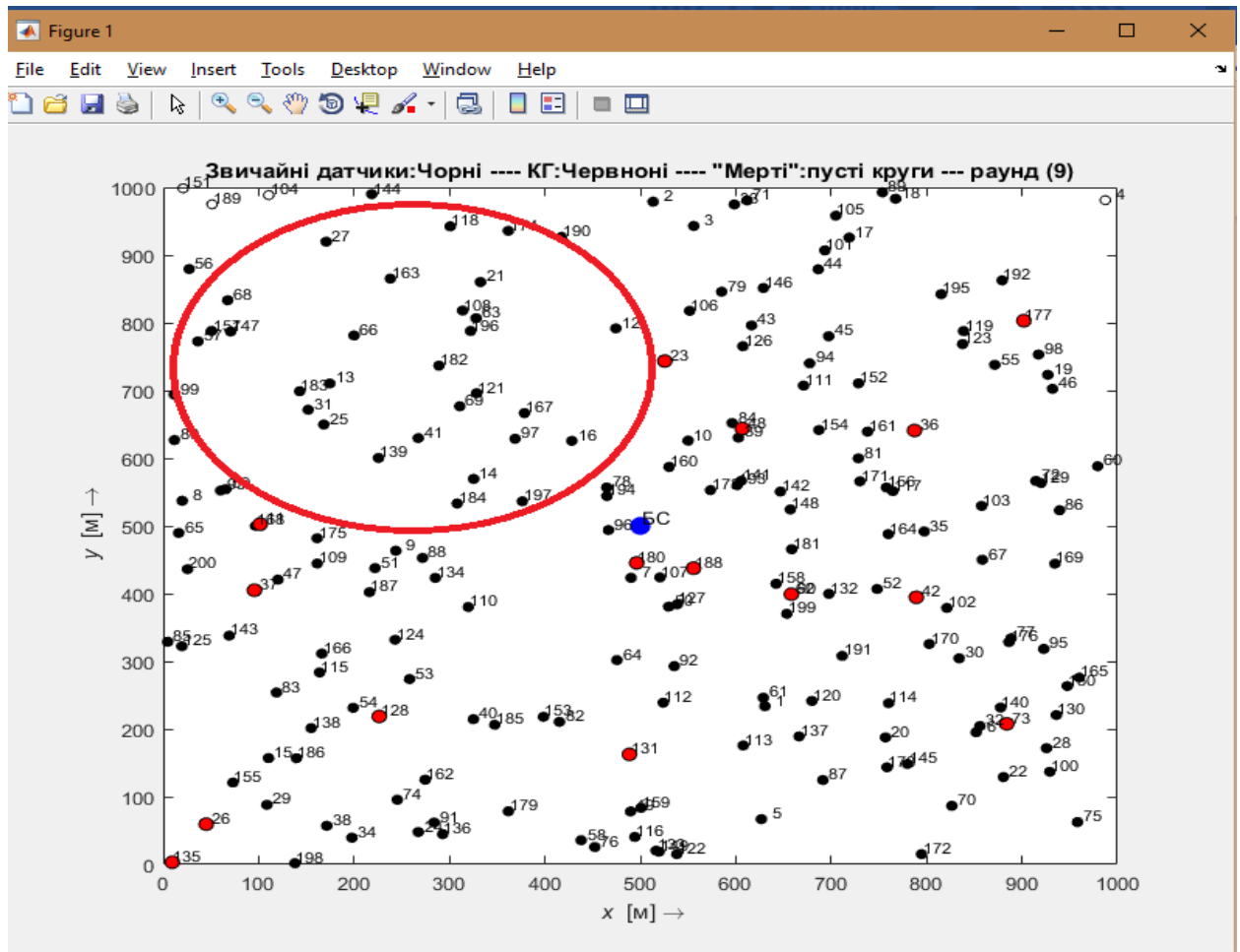


Рис 3.11. Схема симуляція мережі з використання LEACH протоколу

На рисунку 3.12 можна побачити малюнок симуляція мережі при використанні D-LEACH протоколу

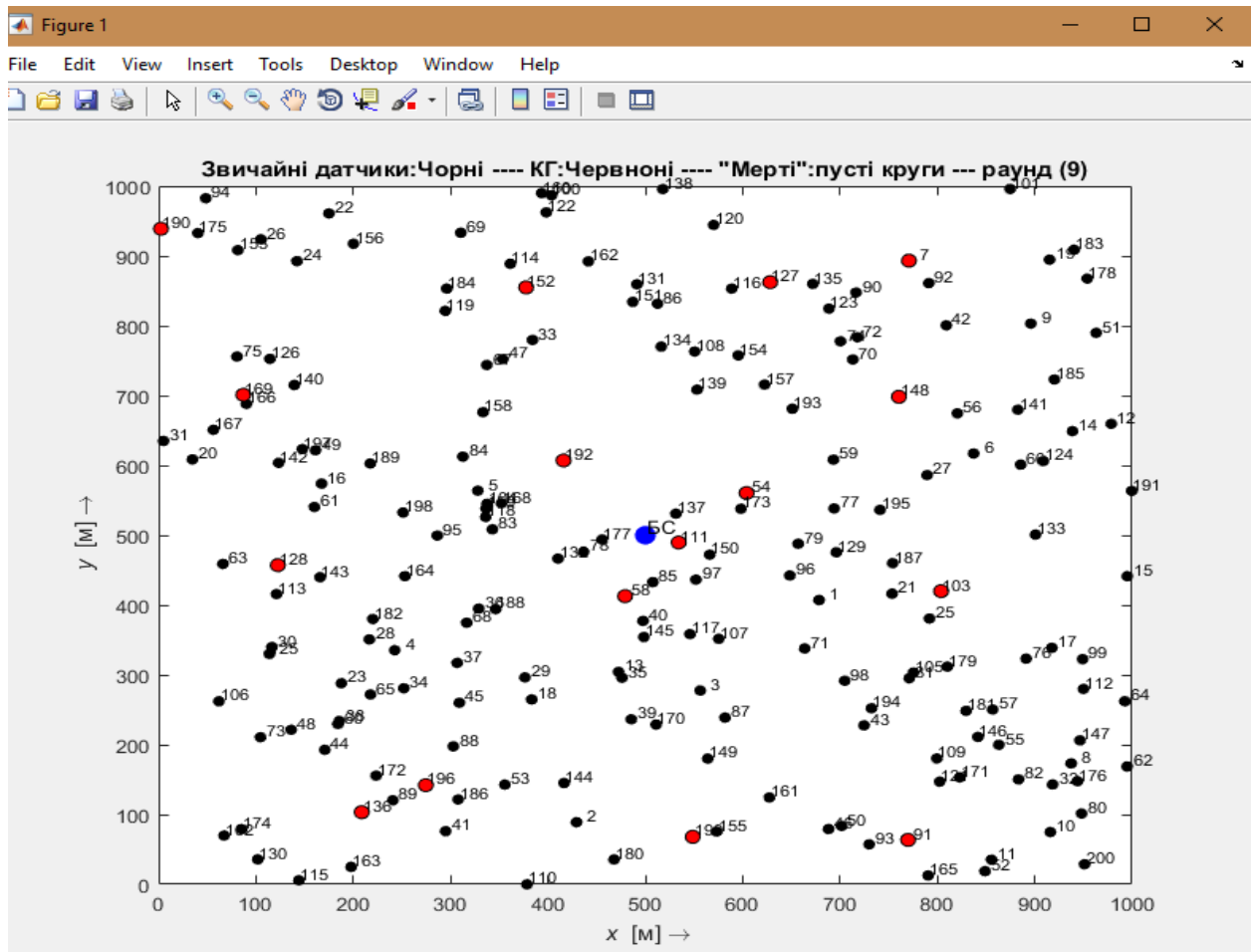


Рис 3.12. Схема симуляції мережі з використанням D-LEACH протоколу

Як видно з малюнка, КГ рівномірно розділені по під регіонам, а отже дистанція до найближчої КГ коротші, а отже затрати енергії в датчиках менші. Нижче приведено три малюнки для LEACH протоколу з кількістю раундів. Для більш правдивого результату повторимо дану операцію три рази

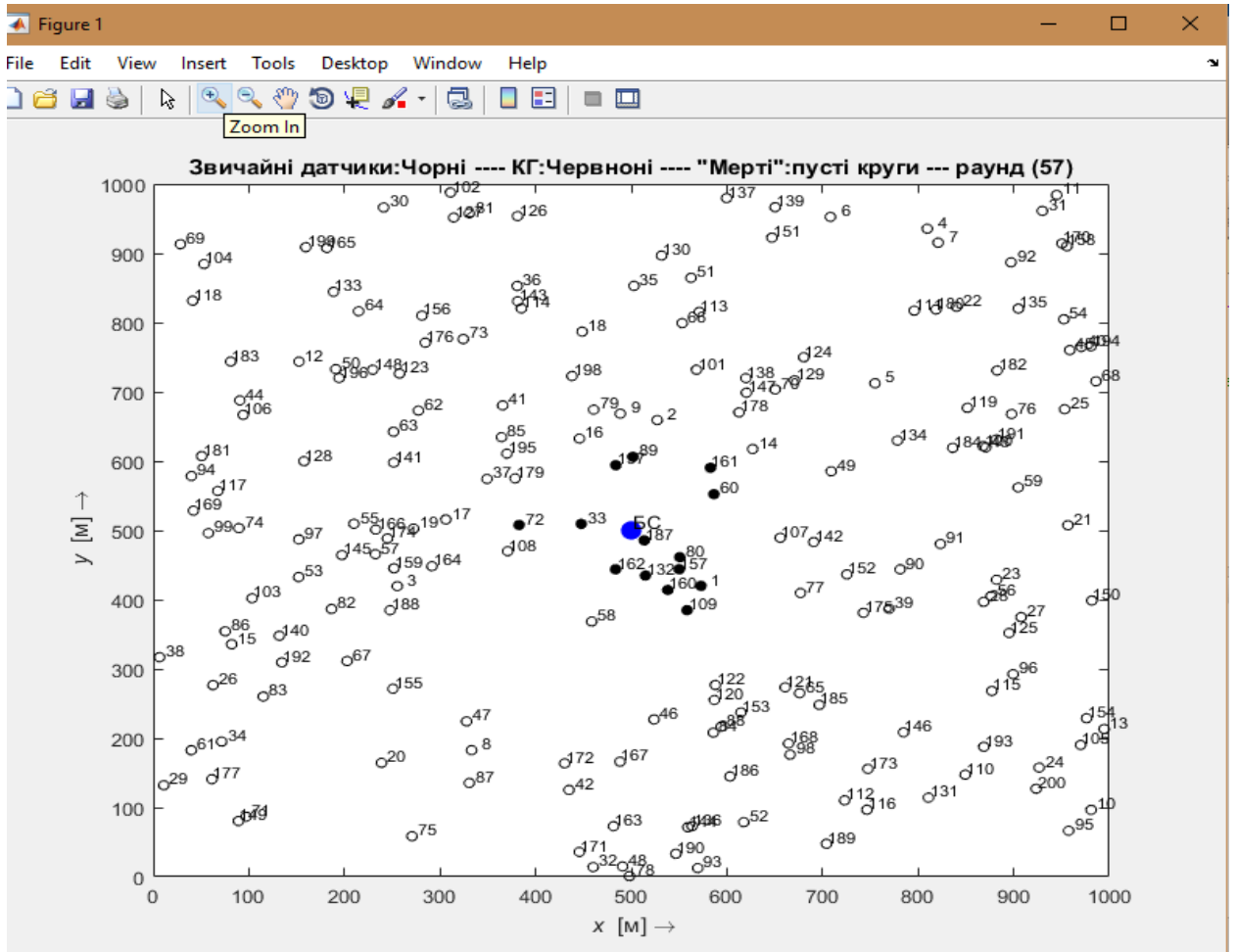


Рисунок 3.13. Перший запуск симуляції LEACH протоколу

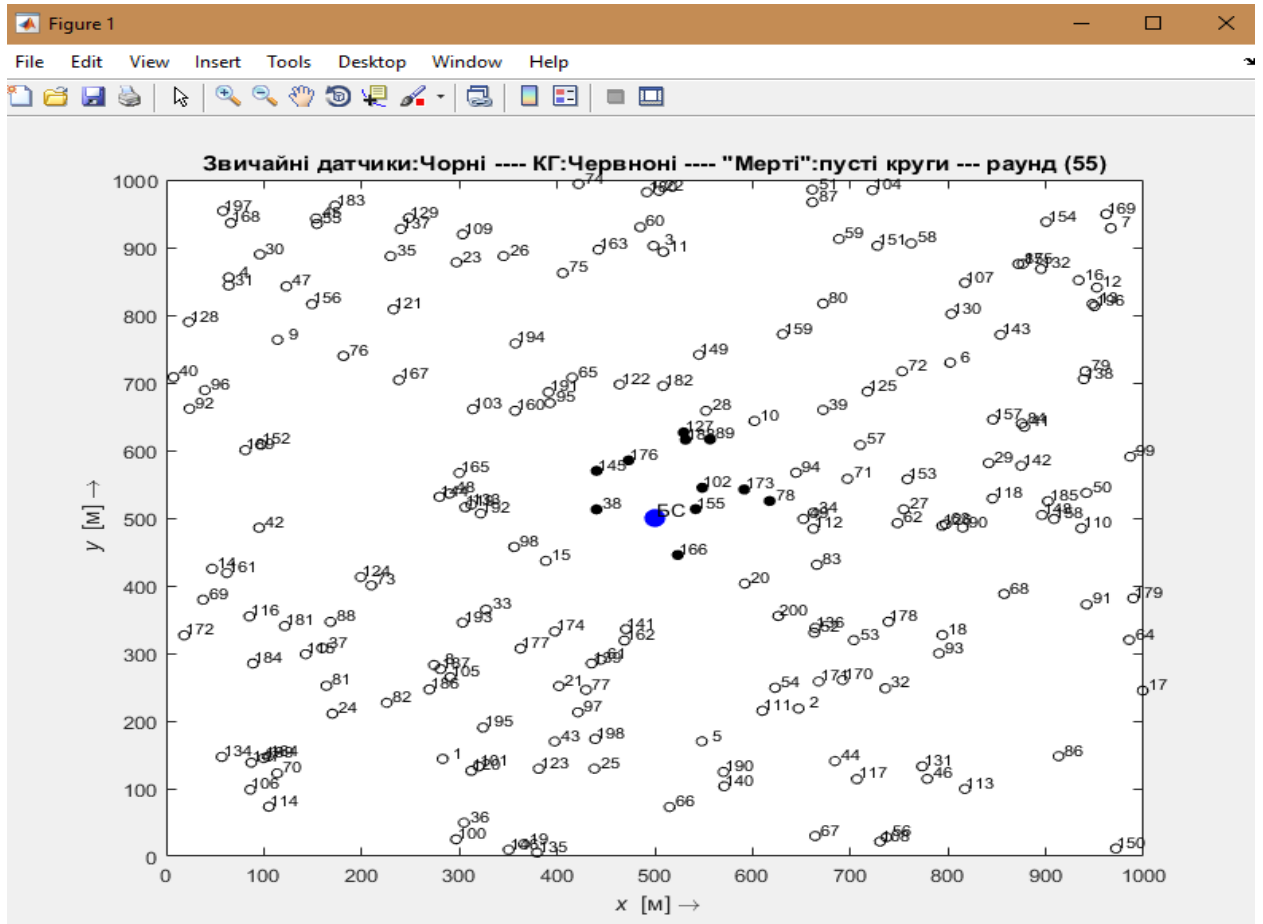


Рисунок 3.14. Другий запуск симуляції LEACH протоколу

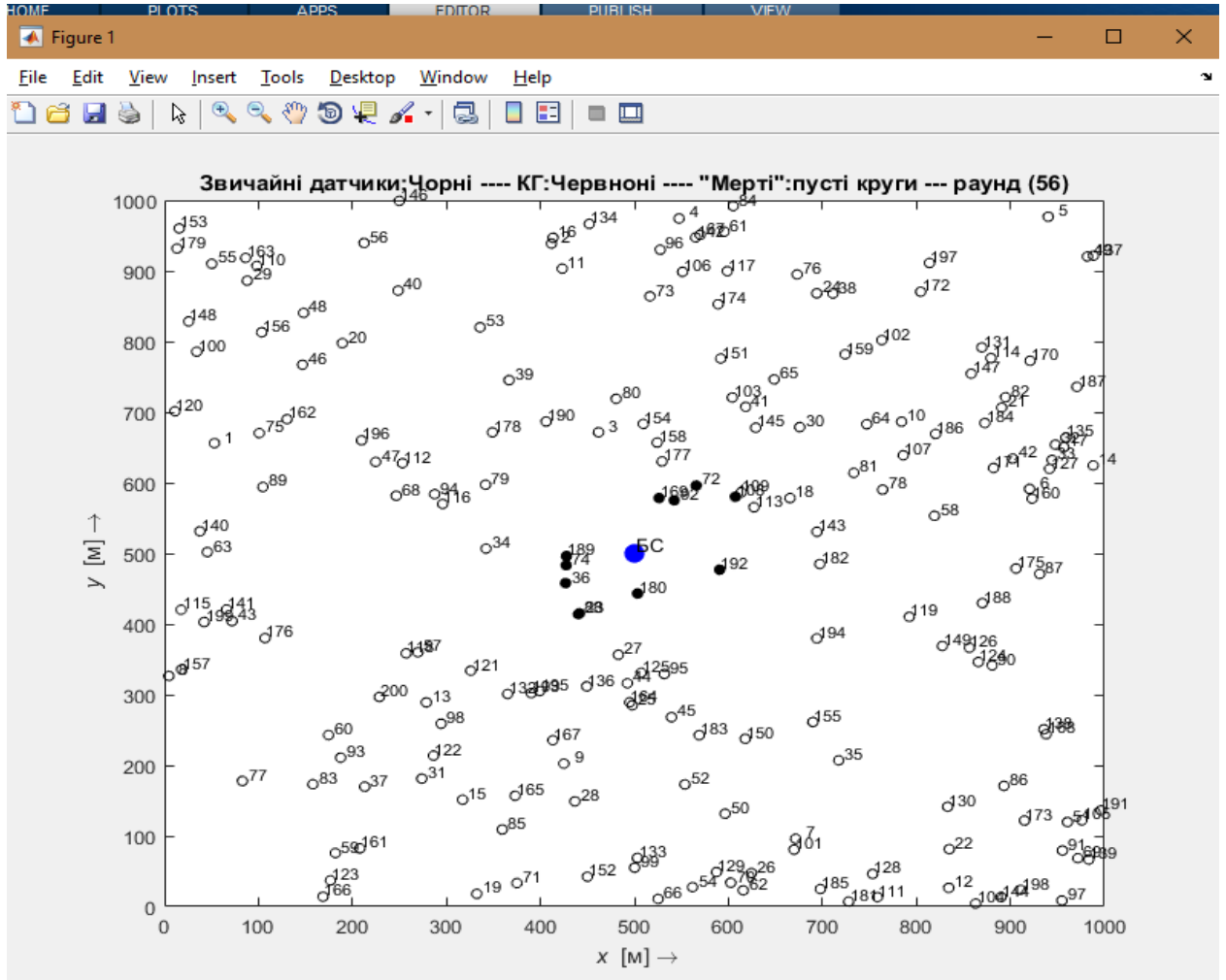


Рисунок 3.15. Третій запуск симуляції LEACH протоколу

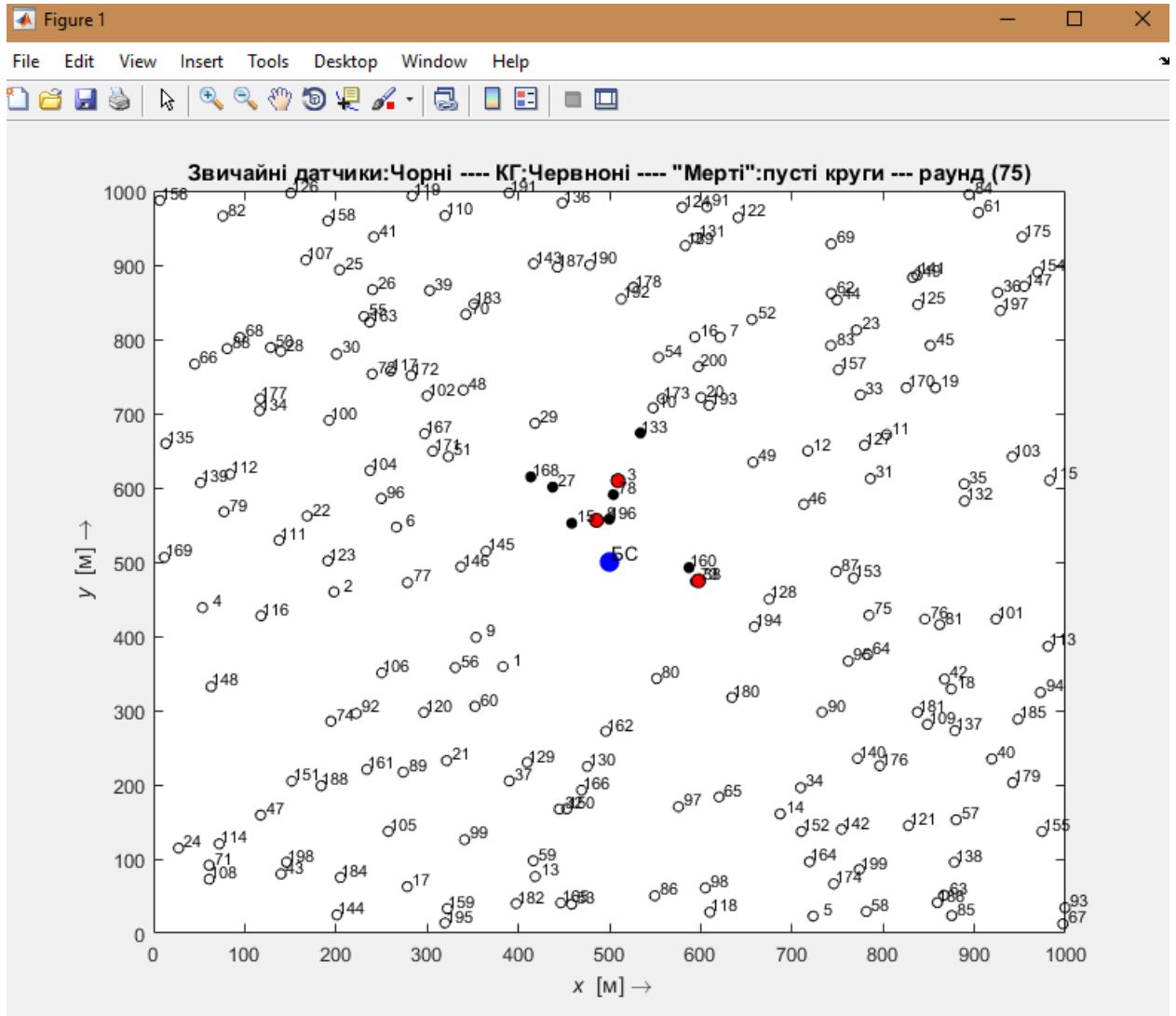


Рисунок 3.16. Перший запуск симуляції D-LEACH протоколу

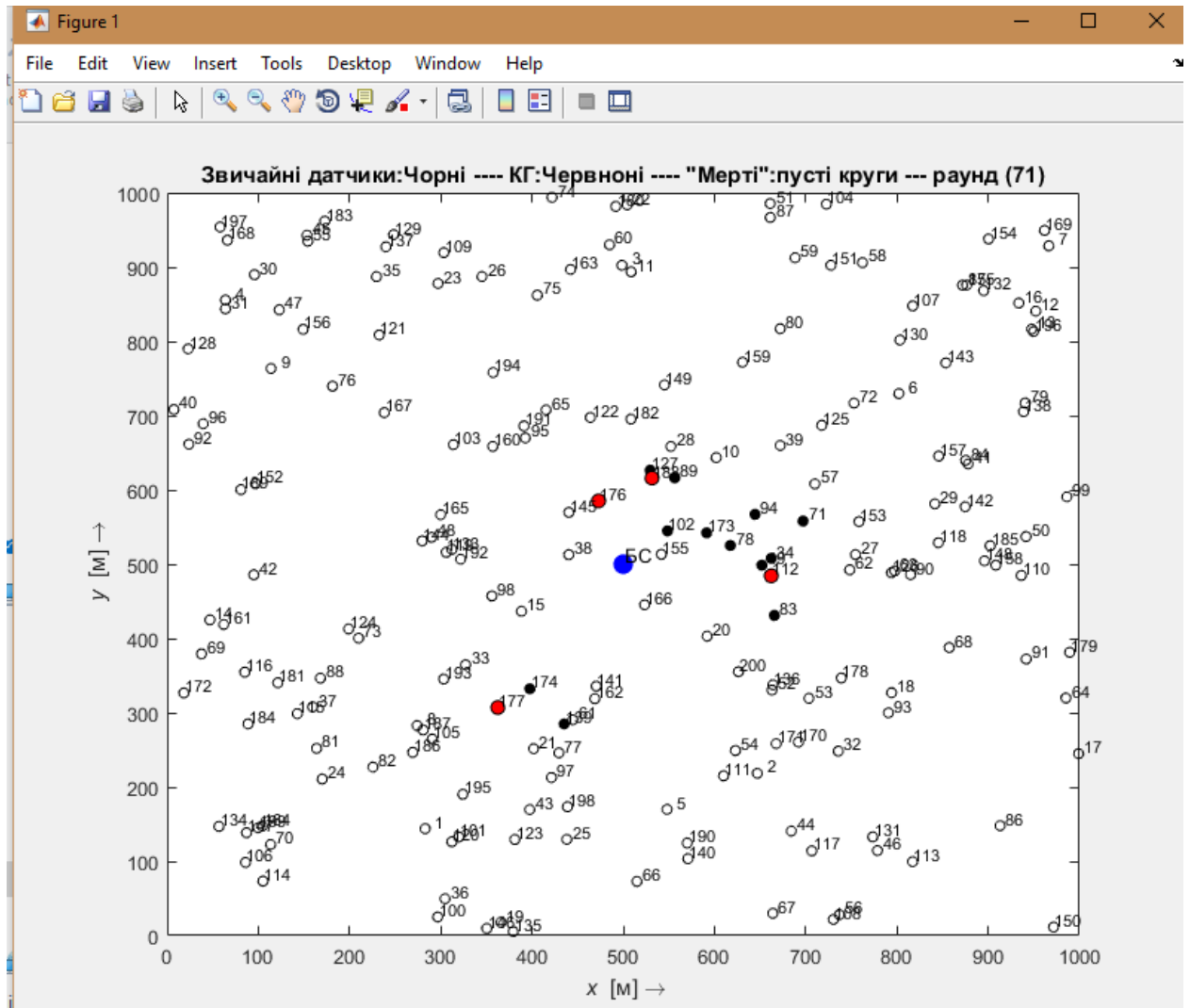


Рисунок 3.17. Другий запуск симуляції D-LEACH протоколу

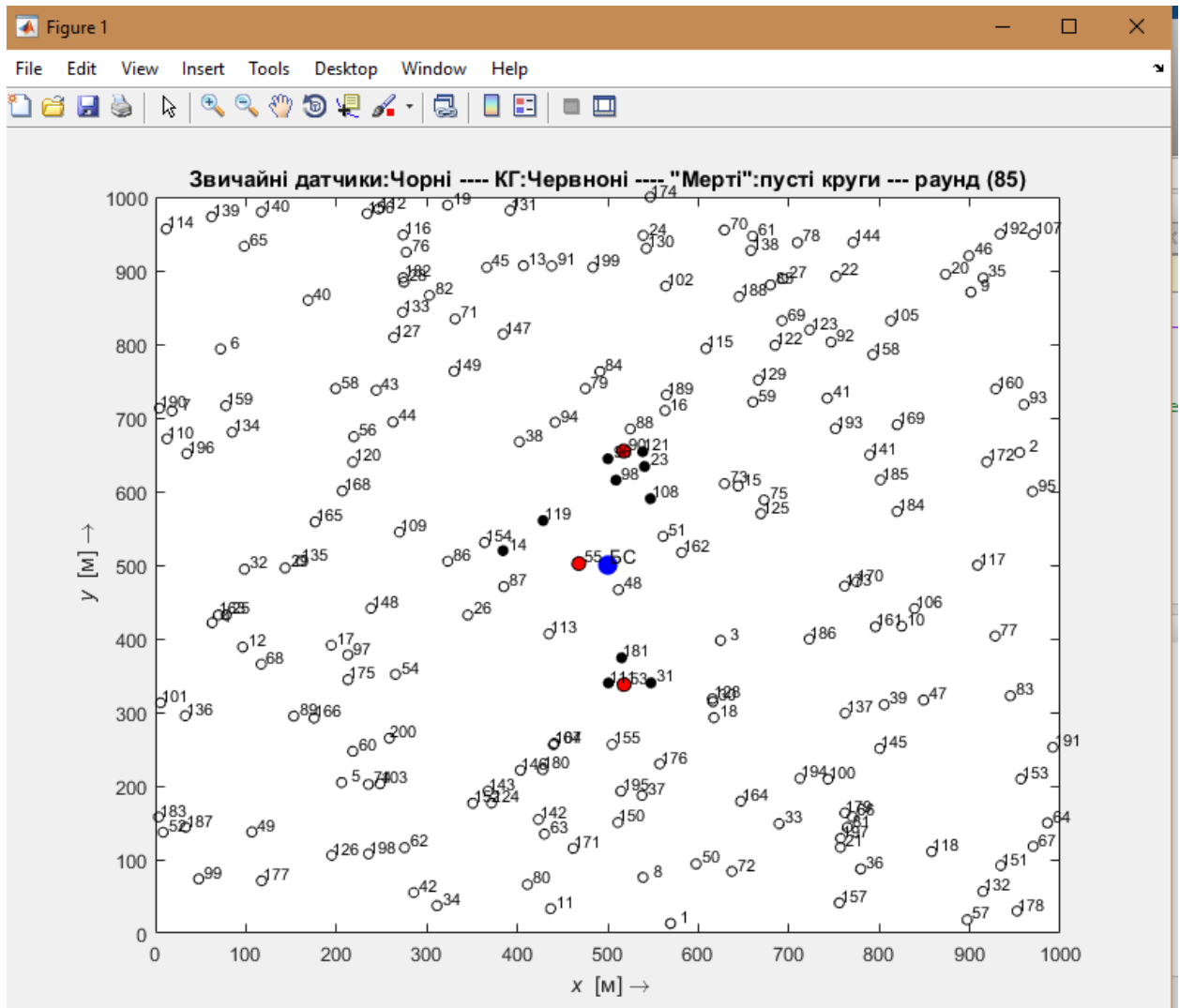


Рисунок 3.18. Третій запуск симуляції D-LEACH протоколу

Як ми бачимо на малюнках при LEACH протоколі мережа пропрацювала: 57, 55 і 56 раундів, при використанні D-LEACH протоколу: 75, 71 і 86 відповідно, що приблизно на 25-30 відсотків довше, ніж при LEACH протоколі. Нище наведені малюнки метрик, які були вказані вище. Дані скріншоти були зроблені при виконанні трьох попередніх симуляцій.

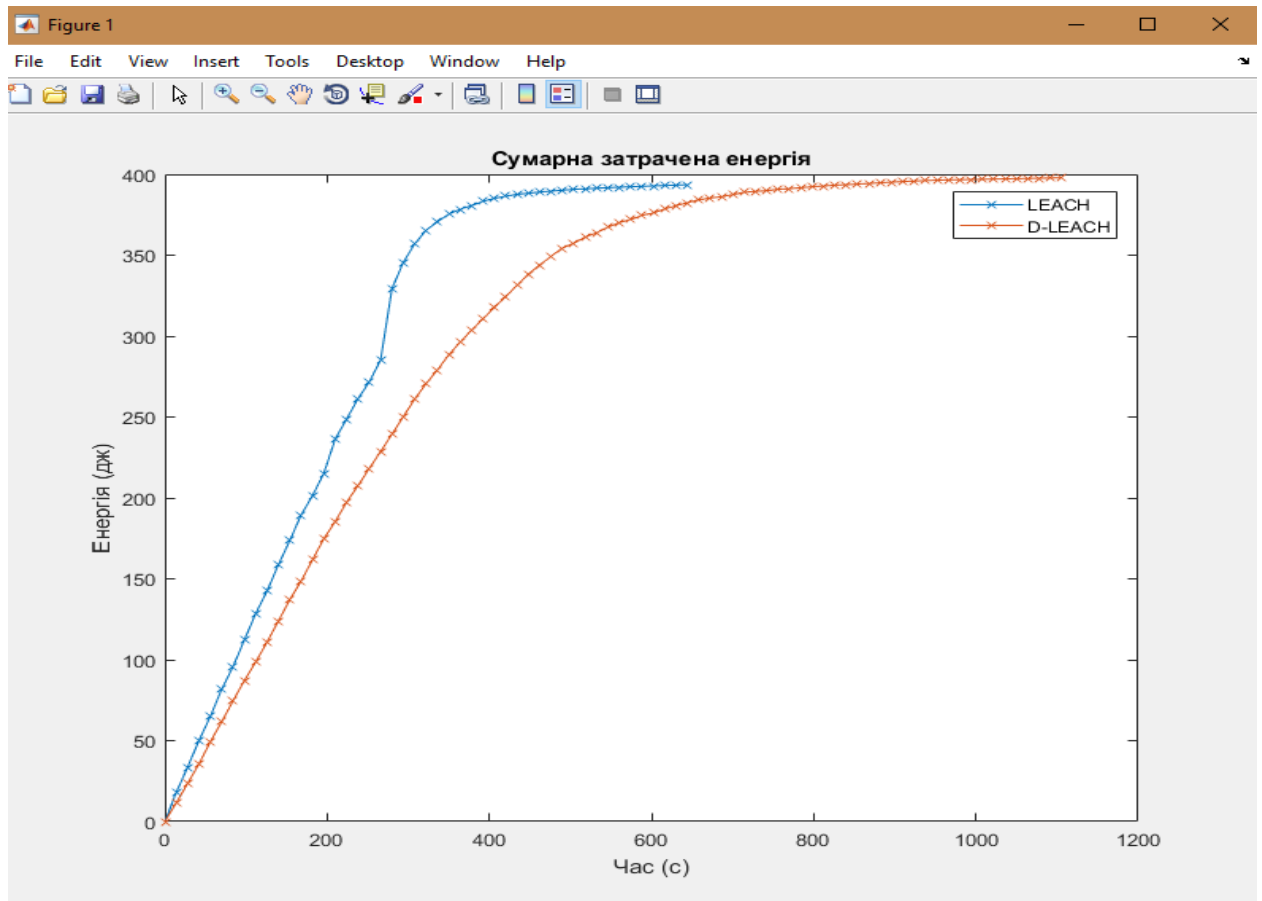


Рис 3.19. Час за який було витрачена сумарна енергія при використанні двох протоколів

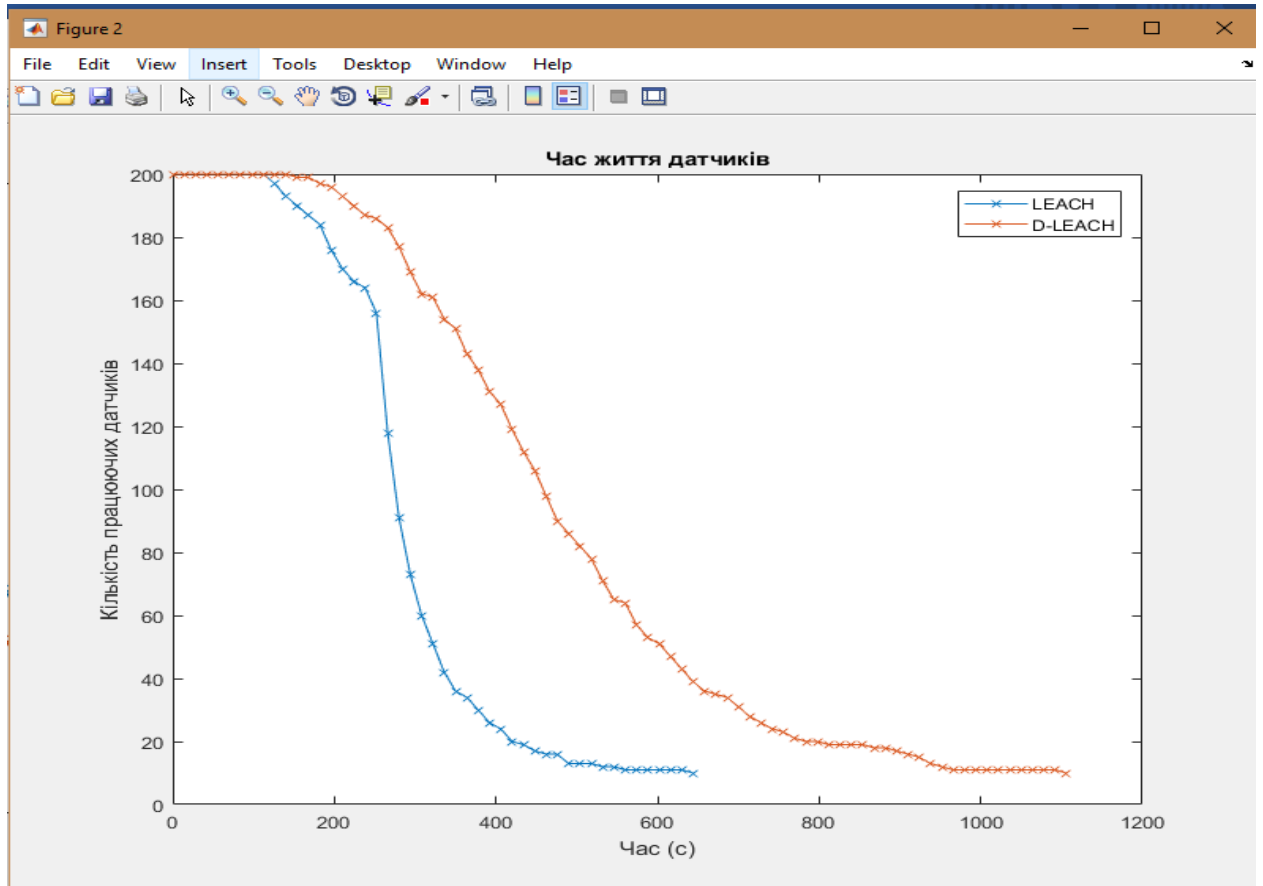


Рис 3.20. Час роботи датчиків при використанні двох протоколів

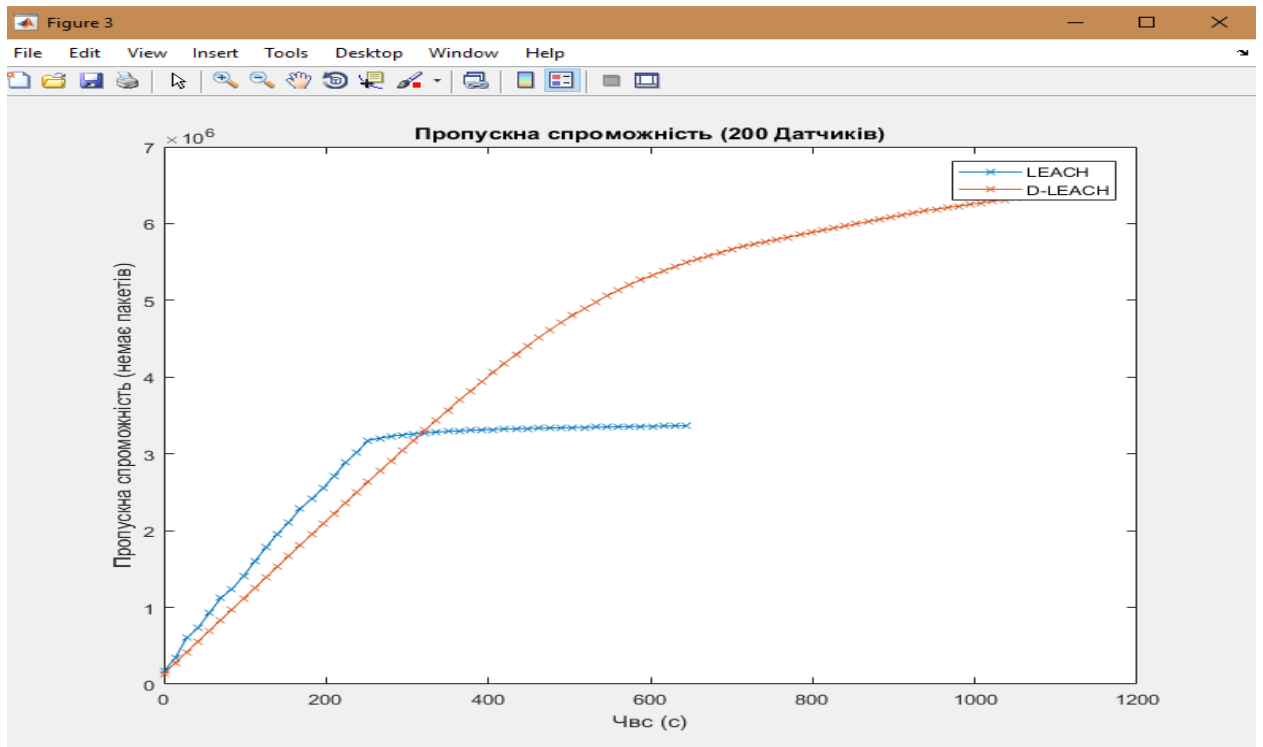


Рис 3.21. Кількість пакетів передах за час роботи мережі

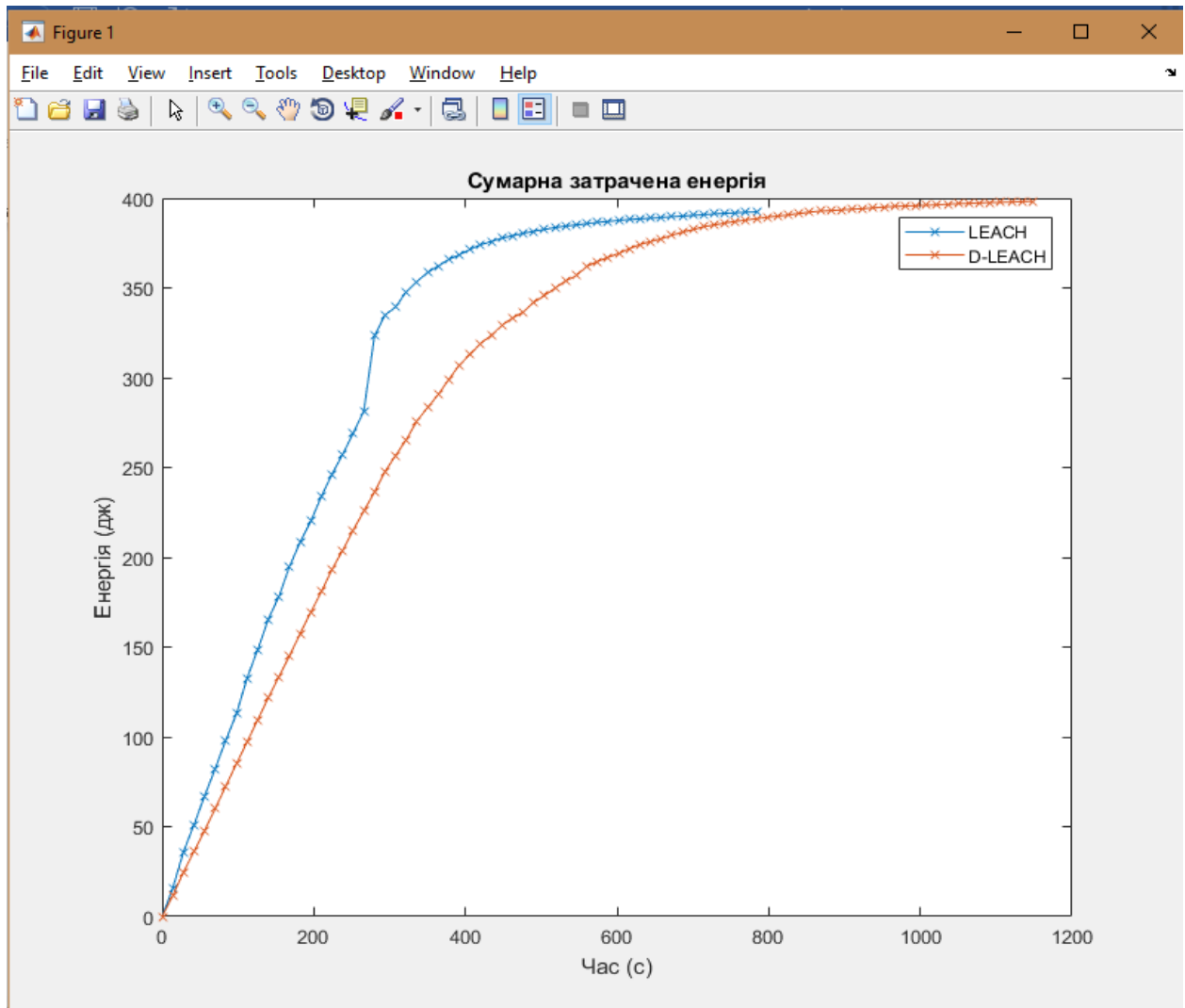


Рис 3.22. Час за який було витрачена сумарна енергія при використанні двох протоколів

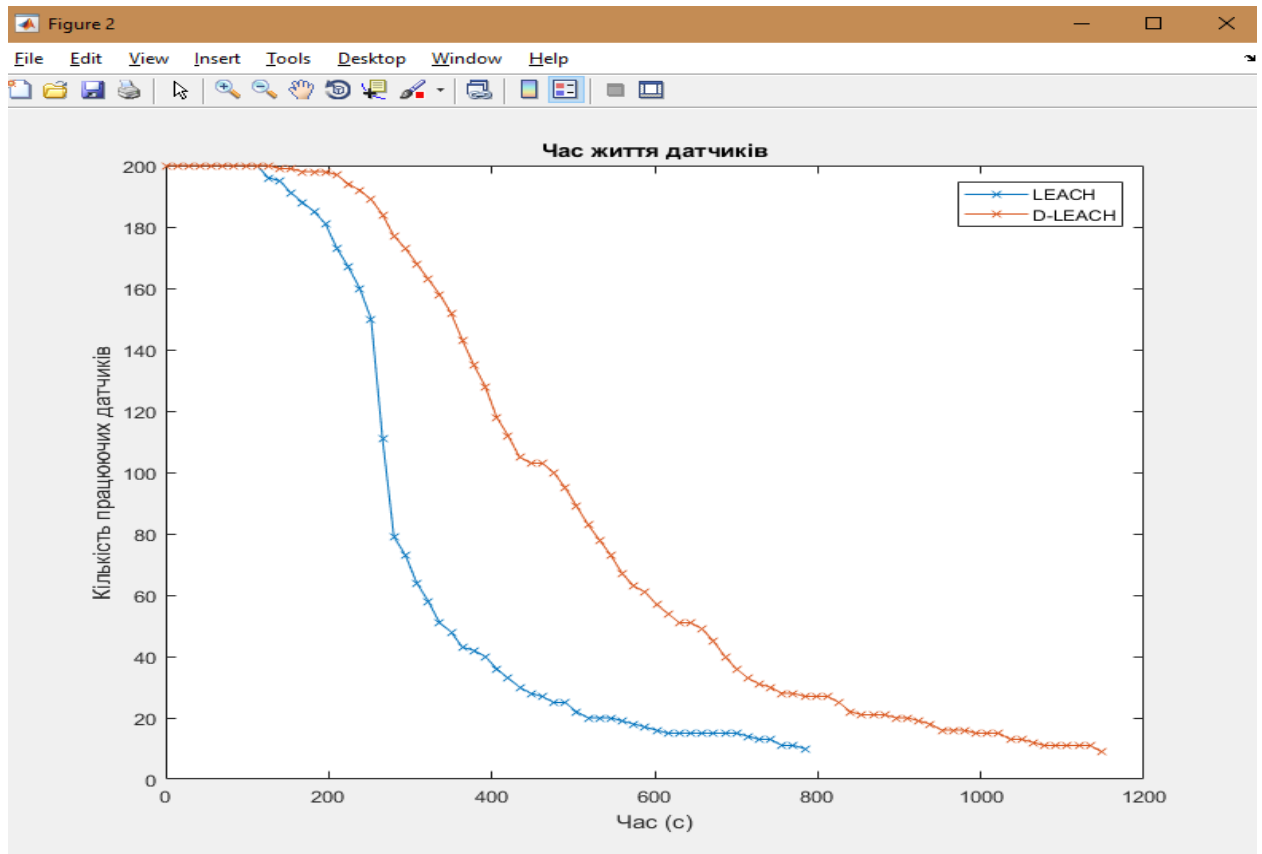


Рис 3.23. Час роботи датчиків при використанні двох протоколів

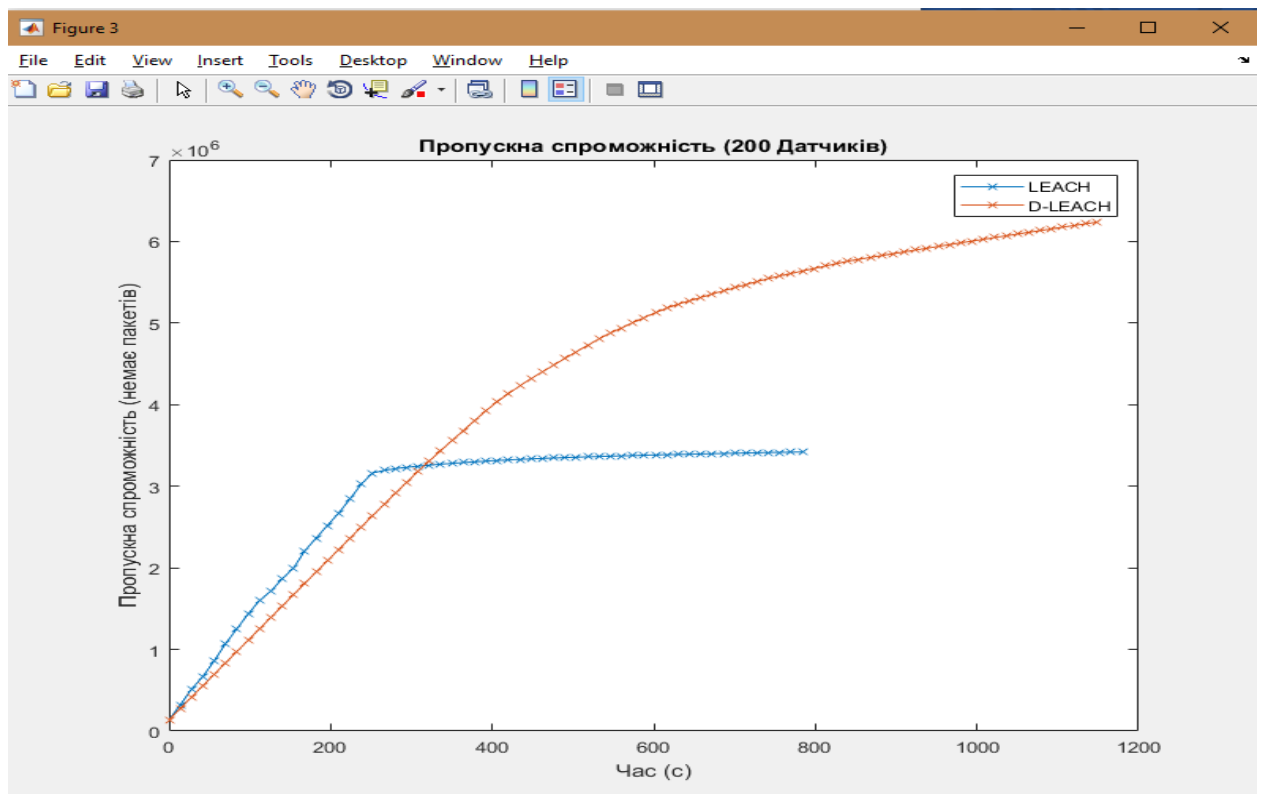


Рис 3.24. Кількість пакетів передах за час роботи мережі

Розмір мережі (датчики)	LEACH		D-LEACH		
	Час роботи (с)	Пропускна здатність(10^3)	Час роботи (с)	Пропускна здатність(10^3)	
200	1	625	3123	1068	6058
	2	831	3157	1072	6064
	3	793	3154	1149	6073

Табл 3.1. Результати симуляції

Висновки до розділу:

У даному розділі ми детально описували і порівнювали ефективність різних способів енергозбереження.

В першому розділі ми оцінювали ефективність MAC протоколів. MAC протоколи можна розділити на конкурентні та неконкурентні. Серед конкурентних ми розглядали такі протоколи, як: S-MAC, T-MAC та WiseMAC, а серед неконкурентних: DEE-MAC. Основна відмінність між ними полягає в тому, що перші – не працюють по графіку передач, тобто всі вузли одночасно конкурують за доступ до середовища, а другі – працюють по графіку передач і тільки один сенсор вузла має доступ до каналу будь-який момент часу. Це дозволяє неконкурентним MAC протоколам уникати колізій, на відмінну від конкурентних, які змушені з ними боротися. Серед S-MAC протоколу і T-MAC менше енергоспоживання буде в другого протоколу. Це пов'язано з тим, що період прослуховування протоколу S-MAC зазвичай фіксується, тоді як період прослуховування протоколу T-MAC залежить від навантаження на трафік, що дозволяє менше споживати енергію. Якщо ж порівнювати T-MAC з DEE-MAC, то менш енергозатратним буде DEE-MAC, тому що він реалізований на базі TDMA, і працює по графіку, що дозволяє вузлам точно знати моменти коли вони повинні активувати датчик для передачі та прийому даних. Це економить більше енергії, але при зміні топології чи трафіку може знадобитися зміна інтервалів чи розмірів кадру, де знадобиться розробити новий графік, а при масштабній мережі зробити це складно. Розглянуто гібридний Z-MAC, який взяв краще з конкурентних і неконкурентних протоколів, що дозволяє ще більше зменшити енергоспоживання.

У другому розділі ми розглянули та оцінювали ієрархічні протоколи маршрутизації, а саме: LEACH та LEACH-C. Було розглянуто їх принцип роботи.

У третьому розділі було запропонований вдосконалений підхід. D-LEACH протокол побудований на базі існуючого LEACH протоколу, але з врахування його недоліків. Було виконане математичне моделювання мережі за допомогою програми Matlab, та виконане порівняння з LEACH протоколом. Після виконання експерименту можна зробити висновок, що при однакових параметрах мережі, але при використанні вдосконаленого підходу D-LEACH протоколу час роботи мережі збільшився на 30-35 відсотків, при цьому кількість пакетів, яку встигають передати датчики до БС приблизно на 35-40 відсотків більша за рахунок дошої роботи мережі.

ВИСНОВОК

В нас час з дня в день сенсорні мережі постійно розвиваються, вдосконалюються та інтегруються в повсякденне життя суспільства. Безпроводові сенсорні мережі - це самоорганізуючі, розподілені, масштабовані мережі, що складаються з безлічі автономних, невеликих за розміром сенсорів (сенсорних вузлів), об'єднаних за допомогою радіоканалу. Завдяки цьому БСМ можуть використовуватися практично у всіх сферах діяльності. Найчастіше їх використовують для організації різних систем моніторингу та контролю, наприклад, в медицині для спостереження за пацієнтами, а також для багатьох інших цілей. Тому побудова БСМ з використанням останніх наукових і технологічних досягнень робить їх надзвичайно актуальною і передовою технологією. Але в зв'язку з тим, що БСМ зазвичай використовують в важкодоступних місцях, де використання звичайних мереж не є можливим, то важливим параметром виступає невелике енергоспоживання безпроводої сенсорної мережі.

У першому розділі були розглянуті загальні поняття БСМ, їх класифікацію, місце застосування та загальні відомості про енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах.

Так як проблему енергозбереження можна вирішувати на різних рівнях еталонної моделі мережі в другому розділі розглянуто декілька способів енергозбереження, які виконуються на різних рівнях моделі OSI, саме:

- використання MAC протоколів, де було розглянуто основне призначення та їх використання, описана їх класифікація та загальні принципи їх роботи, що дозволяє різними способами зменшувати енергоспоживання;
- використання протоколів маршрутизації, де були вказанні основні вимоги, завдання до ефективних алгоритмів маршрутизації, а також класифікацію енергозберігаючих протоколів;

У третьому розділі було детально описано і зроблена оцінка ефективності таких MAC протоколів, як: S-MAC, T-MAC, WiseMAC, DEE-MAC, а також Z-MAC. Можна зробити висновок, що менш енергозатратними є неконкурентний DEE-MAC, в порівнянні з S-MAC, T-MAC, WiseMAC, але при цьому можна стверджувати, що немає ідеального протоколу для енергозбереження, так як неконкурентні протоколи також мають недоліки через які використання у всіх БСМ являється неможливим.

Було запропоновано вдосконалений D-LEACH протокол маршрутизації на базі кластерної архітектури. Метод базується на основі існуючого LEACH протоколу, але вирішує його недоліки. Було побудована математична модель БСМ на базі двох протоколів в програмі Matlab та виконане порівняння їх між собою. Аналіз показав, що при D-LEACH протоколу час роботи мережі збільшився на 30-35 відсотків, при цьому кількість пакетів, яку встигають передати датчики до БС приблизно на 35-40 відсотків більша за рахунок дошої роботи мережі.

Перелік посилань

1. Агафонов Н. Технологии беспроводной передачи данных, «Беспроводные технологии» №1, 2014 г.
2. Варгаузин В.А. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 // ТелеМультиМедиа. 2015. № 6. – С. 23-27.
3. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Беспроводные персональные сети на основе ZigBee. Учебное пособие. – СПб: ГУАП, 2015. – 58 с.
4. C.Siva Ram Murthy, B.S.Manoj —Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols, Prentice Hall, 2004, 880p.
5. F.Akyildiz,W.Su,Y.Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: a Survey",Computer Networks ,Vol 38, 2002.
6. J.Chang, L.Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad hoc networks", Nineteenth International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies , 2000.
7. G.Anastasi,M.Coti,M.Francesco,A.Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey", Elsevier, Ad Hoc Network ,2009.
8. I.Demirkol,C.Ersoy,F.Alagöz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey", IEEE Communications Magazine, April, 2006.
9. D. B Johnson et al., "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks", in Mobile Computing, edited by Tomas Imielinski and Hank Korth, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 0792396979, 1996, Chapter 5. Pp. 153 - 181.
- 10.S.Cho, K.Kanuri, J.Cho,J.Lee,S.-D.June,"Dynamic Energy Efficient TDMA-based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks",Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services,pp.48 – 48, 2005.
- 11.W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H.Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks" in IEEE

- Transactions on Wireless Communications (October 2002), vol. 1(4). Pp. 660-670.
12. W. Lou, "An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", Proceedings of IEEE MASS'05, Washington DC, Nov. 2005. Pp. 1-8.
 13. Миночкин А.И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
 14. Миночкин А.И. Управление топологией мобильной радиосети / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
 15. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях / Романюк В.А. // Зв'язок. – № 3. – 2002. – С. 21 – 25.
 16. Миночкин А.И. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2001. – №1. – С. 31–36.
 17. Lloyd E.L. Algorithmic Aspects of Topology Control Problems for Ad hoc Networks / Lloyd E.L., Liu R., Marathe M.V., Ramanathan R., Ravi S.S. // In Proceedings of IEEE MOBIHOC. – 2002.
 18. Міночкін А.І. Аналітичне моделювання автоматизованих мереж радіозв'язку / Міночкін А.І., Романюк В.А. // Збірник наукових праць КВІУЗ. – № 1.– 2001. – С. 88 – 94.
 19. Ossama Younis and Sonia Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-efficient Approach", September 2002.
 20. I.Rhee, A.Warrier, M.Aia et al, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Transactions, pp.511 – 524, 2008.
 21. S. Ali Md, D. Tanay, B. Rahul, "ALEACH advanced LEACH routing protocol for wireless microsensor networks", In: Proc. ICECE 2008, Dec. 2008.

- 22.S. Lindsey and C.S. Raghavendra, "PEGASIS:Power-efficient Gathering in Sensor Information System", Proceedings IEEE Aerospace Conference, vol. 3, Big Sky, MT, Mar. 2002, Pp. 1125 -1130.
- 23.A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks", in the Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- 24.Ramanathan R. On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas / Ramanathan R. // In Proceedings of ACM/SIGMOBILE MOBICOM. – 2001.
- 25.Takagi H. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals / Takagi H., Kleinrock L. // IEEE Transaction Communications. – № 32. – 1984. – Pp. 246 – 257.
- 26.Тобаги Ф.А. Моделирование и анализ характеристик пакетных радиосетей / Тобаги Ф.А. // ТИИЭР. – № 1, – 1987. – С. 162 – 186.
- 27.Wattenhofer R. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad-hoc Networks / Wattenhofer R., Li L., Bahl P., Wang Y.-M. // In Proceedings of IEEE INFOCOM. – 2001.
28. Li L. Analysis of a Cone-Based Distributed Topology Control Algorithm for Wireless Multihop Networks / Li L., Halpern J.Y. // In Proceedings of ACM PODC. – 2001.
- 29.Li X.-Y. Distributed Construction of Planar Spanner and Routing for Ad Hoc Wireless Networks / Li X.-Y., Calinescu G., Wan P.-J. // In Proceedings of IEEE INFOCOM. – 2002.
- 30.Li X.-Y. Sparse Power Efficient Topology for Wireless Networks / Li X.-Y., Wan P.-J., Wang Y., Frider O. // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2002.
- 31.Романюк В. А. Геомаршрутизация в мобильных радиосетях / Романюк В. А // Зв'язок. – 2001. – № 5. – С. 37 – 39.