

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)

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,

(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

на тему: «Удосконалений метод енергоефективної кластеризації в безпроводових сенсорних мережах»

Виконала: студентка 2 курсу, групи ТЗ-381мп
(шифр групи)

Матяш Анастасія Олегівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник старший викладач, к.н.т. Валуйський С.В.

(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 – 2019 рік

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Матяш Анастасії Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Удосконалений метод енергоефективної кластеризації в безпроводових сенсорних мережах» _____

науковий керівник дисертації старший викладач, к.н.т. Валуйський С.В.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «_07_» «_11_» 2019р. №_3854-с_

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження мережа WSN.

4. Предмет дослідження енергоефективна маршрутизація у WSN. Алгоритми збору даних з датчиків та алгоритми передачі даних в мережах WSN.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1.Провести аналіз існуючих алгоритмів і протоколів збору та передачі даних безпосередню в мережі WSN.

2.Вибрати доцільний алгоритм з мінімальними зайвими енерговитратами.

3.Впровадити обраний алгоритм в можливу модель.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Теоретичні відомості WSN, технології енергоефективної маршрутизації, приклади застосування. Презентація на 10 слайдах.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук та опрацювання літератури з теми наукового дослідження.	Вересень-жовтень 2017	
2	Огляд сучасних матеріалів та публікацій по результатам досліджень в сфері безпроводових сенсорних мереж	Листопад-грудень 2018	
3	Написання першого та другого розділів	Січень 2018	
4	Написання третього та четвертого розділів	Лютий- червень 2018	
5	Написання п'ятого розділу розділу	Липень - жовтень 2018	
6	Підбиття підсумків, оформлення та редагування розділів роботи.	Листопад-грудень 2018	

Студентка

(підпис)

Матяш А. О.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Валуйський С. В.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 83 с., 30 рис., 27 джерел.

WSN, Cluster Head (CH), QoS, маршрутизація, енергоефективність.

Мета дослідження: аналіз та впровадження енергоефективного алгоритму кластеризації в мережі WSN.

Об'єктом дослідження є мережа WSN.

Предмет дослідження: енергоефективна маршрутизація у WSN. Алгоритми збору даних з датчиків та алгоритми передачі даних в мережах WSN.

Структура роботи: Робота складається із реферату, abstract, змісту, переліку скорочень та термінів, вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків та списку використаних джерел.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що були проаналізовані різні системи отримання та обробки даних, які були обрані з числа найоптимальніших з погляду енергоефективності, швидкості обробки даних, простоти налаштування та використання.

Результати досліджень, які приводяться в дипломній роботі можуть бути використані в будь-яких сферах, у яких Інтернет з'єднання і обчислювальна здатність поширюється на безліч об'єктів, пристроїв і давачів, також в навчальних дисциплінах, які розглядають мережі Інтернет речей.

Результати досліджень оприлюднені на науково-технічній конференції «ЛІТНІ НАУКОВІ ДИСКУСІЇ»:

Валуйський С.В. Аналіз енергоефективності в мережах WSN [Текст]/С.В. Валуйський, А.О. Матяш //Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ». – Київ, 2019. – С. 1 – 5.

ABSTRACT

The diploma work consists: 83 p, 30 figures, 2 additions, 27 references to the source.

WSN, Cluster Head (CH), QoS, routing, energy efficient.

Goal: analysis and implementation of energy efficient algorithm in the WSN network.

Object of research: WSN network.

Subject of the study: energy efficient routing in WSN. Sensor data acquisition algorithms and data transmission algorithms in WSN networks.

Scientific novelty is that analyzed various systems receive and process data that have been selected from among the most optimal in terms of efficiency, processing speed, ease of setup and use.

The research that resulted in the diploma work can be used in any areas where Internet connectivity and computing capability extends to many objects, devices and sensors, as well as educational disciplines that consider the Internet of things.

Research results are published in scientific conference:

Валуйський С.В. Аналіз енергоефективності в мережах WSN [Текст]/С.В. Валуйський, А.О. Матяш //Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ». – Київ, 2019. – С. 1 – 5.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕРЕЖАХ ТА МОЖЛИВИХ АЛГОРИТМІВ У МЕРЕЖАХ WSN.....	10
1.1. Проблематика енергоефективності у WSN.....	10
1.2. Можливі шляхи для вирішення проблем енергоефективності у WSN.....	11
1.3. Варіанти ініціалізації передачі даних.....	13
1.4. Опис стеку протоколів на рівні вузла.....	14
1.5. Оптимізація навантаження за допомогою балансування у WSN.....	16
1.6. Розгляд протоколів енергоефективної маршрутизації у кластерних системах WSN.....	16
Висновок до розділу 1.....	19
2. АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ У WSN.....	20
2.1. Досягнення компромісу використання енергії в бездротових сенсорних мережах.....	20
2.1.1. Мультиметричний протокол.....	20
2.1.2. Мізшаровий підхід в кластерній системі.....	22
2.1.3. Багатоцільова оптимізація.....	23
2.2. Лінія управління.....	23
Висновок до розділу 2.....	25
3. УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ У WSN.....	26
3.1. Алгоритм кластеризації Energy Efficient Credit-Based.....	26
3.2. Алгоритм вибору датчика для удосконалення маршрутизації.....	27
3.3. Вибір вузлів, що відповідатимуть за релейний зв'язок.....	28
Висновок до розділу 3.....	32
4. МЕТОДИКА ВИБОРУ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ WSN.....	33
4.1. Огляд існуючих алгоритмів.....	33
4.2. Пов'язані проекти.....	35
4.3. Загальна ідея проекту.....	36
4.3.1. Фіксований підхід.....	37

					КПІ ім.Ігоря Сікорського 3854с 07.ТЗ-з81мп.2019.ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Матяш			Удосконалений метод енергоефективної кластеризації в безпроводових сенсорних мережах	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Валуйський					6	83
Реценз.								
Н. Контр.		Петрова						
Затверд.		Явіся						
					Пояснювальна записка			

4.3.2. Адаптивний підхід.....	38
4.3.3. Підхід на основі SMS.....	39
4.3.4. Адаптивна стратегія.....	39
4.3.5. Підхід зі сторони датчика.....	43
4.3.6. Підхід зі сторони телефону.....	44
4.3.7. Алгоритм EENIS.....	45
4.3.5. Підхід на основі SMS.....	50
4.4. Моделювання та аналіз затримки.....	52
4.4.1. Моделювання затримки.....	53
4.5. Використання Bluetooth та ZigBee з адаптивним підходом.....	55
4.5.1. Затримка аналізу.....	57
4.6. Моделювання.....	58
4.6.1. Налаштування моделювання.....	58
4.6.2. Результати моделювання.....	60
4.7. Адаптивний підхід та підхід на основі SMS.....	66
4.8. Впровадження енергоефективної кластеризації в безпроводній сенсорній мережі.....	71
4.8.1. Введення.....	72
4.8.2. Загальна архітектура прототипу.....	73
4.8.3. Датчик вузла.....	73
4.8.4. Точка доступу ZigBee.....	75
4.8.5. Мобільний телеон.....	76
4.8.6. Серверна частина.....	77
Висновок до розділу 4.....	79
 ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	 80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

WSN – (Wireless Sensor Network) – бездротова сенсорна мережа

QoS – (Quality of Service) – якість послуг, які надає комунікаційна мережа

CH – (Cluster Head) – головний вузол кластера

DSR – (Dynamic Source Routing) – протокол динамічної маршрутизації

SPIN – (Sorting Points into Neighborhoods) – сортування точок за позицією

LEACH – ієрархія кластеризації

GBR (Gradient Basic routing) – Маршрутизація на основі градієнта

PEGASIS – Енергоефективний збір даних в сенсорних інформаційних системах

RSSI – (Received Signal Strength Indicator) – Отриманий показник сили сигналу

MAC – (Media Access Control) – управління доступом до носія

ERTLD – удосконалена маршрутизація в режимі реального часу

ВСТУП

Бездротові сенсорні мережі (WSN) є ключовими компонентами систем (QoS). Їх можна інтегрувати в складні комплекти, щоб відповісти на поточні суспільні проблеми такі як старіння населення, оптимізація природних ресурсів та скорочення вуглецевого сліду. Як правило, кінематичні датчики можуть використовуватися для віддаленого нагляду за літнім пацієнтом, датчики вологості можна використовувати для управління зрошенням поля для більш стійкого сільського господарства, а підключені транспортні засоби допоможуть оптимізувати управління міським рухом, обмежуючи забруднення.

У цьому контексті очікується, що датчикові вузли будуть працювати автономно, в зоні без нагляду протягом тривалого періоду часу, оскільки не завжди вдається вручну слідкувати за датчиками через їх кількість, витрати на обслуговування або недоступність контрольованих областей. Дійсно, датчики - це пристрої з акумулятором, що мають жорстке обмеження ресурсів, особливо з точки зору енергії. Виснаження одного компонента може поставити під загрозу роботу всієї мережі. Тому існує потреба у розробці енергоефективних рішень для збільшення тривалості роботи мережі.

У цій тезі пропонується нова стратегія збереження енергії в бездротових сенсорних мережах, щоб час роботи цих мереж можна було збільшити. Роботу можна розділити на дві основні сфери фокусування, а саме загальні бездротові сенсорні мережі та носії сенсорних мереж, орієнтовані на охорону здоров'я.

Результати показують, що термін експлуатації сенсорних мереж може бути продовжений за допомогою запропонованих стратегій.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕРЕЖАХ ТА МОЖЛИВИХ АЛГОРИТМІВ У МЕРЕЖАХ WSN

1.1 Проблематика енергоефективності у WSN

Бездротова сенсорна мережа (WSN) - це розподіл автономних датчиків, які спільно контролюють фізичні чи екологічні умови, такі як температура, вібрація, тиск, звук тощо. WSN використовуються в багатьох областях, включаючи домашню автоматизацію, моніторинг стану здоров'я чи охорону здоров'я, контролю та моніторингу промислових процесів тощо. WSN розширяється, а впровадження багатофункціональних та надійних WSN має надзвичайно важливе значення.

Процес прогнозування даних вузлами в WSN здебільшого залежить від фізичного рівня датчика. Умови та рішення проблеми виявлення багато в чому базуються на апаратному, а не програмному забезпеченні. Після прогнозування, вузол повинен знайти кому і як передавати отримані дані. Після цього черга переходить до процесу передачі даних. Цей процес не вимагає великих зусиль від сенсорного вузла через невеликий розмір потрібних даних.

Низький рівень споживання енергії є критичним завданням WSN, особливо в сенсорних мережах, що складаються з вузлів, невеликою вагою та обмеженим живленням акумулятора. Найбільш критичним процесом в сенсорних мережах є маршрутизація. Таким чином, потрібно мати механізм маршрутизації для зменшення енергії споживання в сенсорних вузлах та для збільшення терміну служби мережі. Чим швидше йде процес маршрутизації, тим довший термін служби вузла датчика і менше споживання енергії. Отже, розвиток ефективної маршрутизації є вирішальним завданням у WSN.

З одного боку, низьке споживання енергії є важливим обмеженням в мережах датчиків, які складаються з легких вузлів з обмеженою акумуляторною потужністю. Отже, збереження енергії стає критичним завданням у таких мережах. З іншого боку, маршрутизація, є критичним процесом в сенсорних

мережах через споживанням енергії, затримкою в кінцевому результаті та великими накладними витратами. Таким чином, для скорочення затримки потрібно мати хороший механізм маршрутизації для збільшення терміну служби мережі. Також сам час ініціалізації маршрутів має бути оптимізований з енергетичних міркувань. Крім того, рівномірна збалансованість ресурсів запобігає утворенню вузьких місць, і це ще одна складна проблема.

1.2 Можливі шляхи для вирішення проблем енергоефективності у WSN

Для підвищення продуктивності WSN маршрутизації може використано одночасно декілька шляхів. При узгодженій маршрутизації дані будуть поширюватись лише після того як буде виконана обробка інформації, запобігання її дублювання, відмітка часу та ін. Протоколи маршрутизації пов'язані з архітектурною моделлю і сильно залежать від моделі реалізації. Наприклад протокол який використовується для встановлення стабільності маршруту і мінімізації споживання енергії, суттєво впливає на модель передачі даних (рис. 1.1).

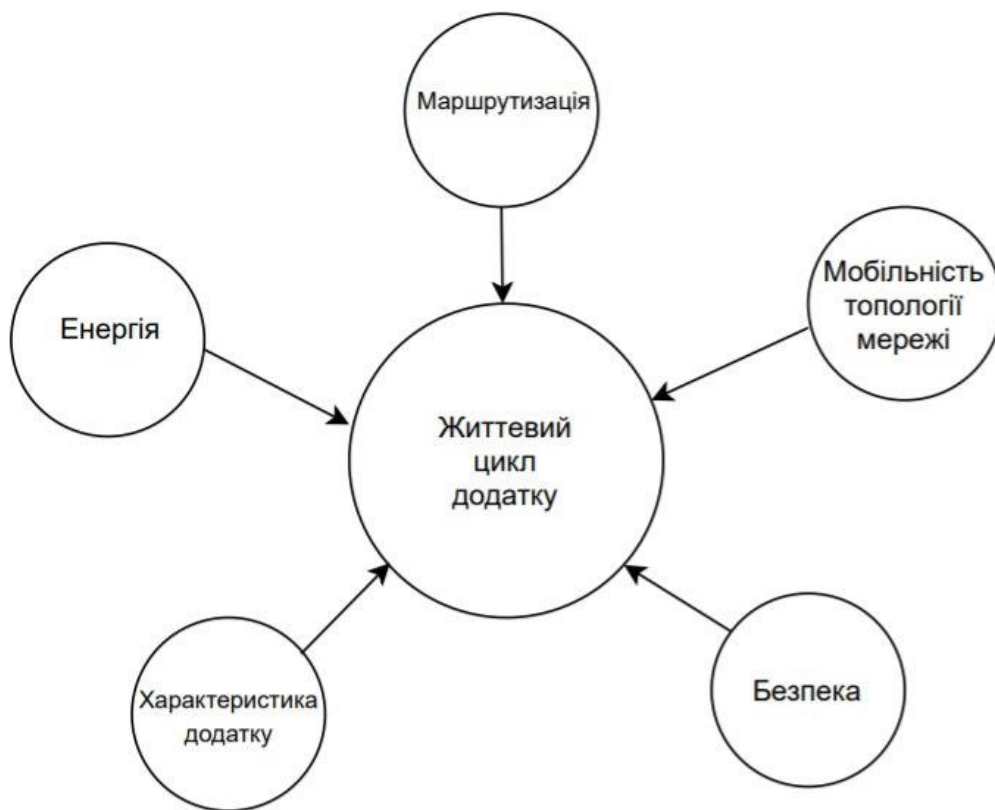


Рис. 1.1 Ілюстрація параметрів, що впливають на маршрутизацію

Що стосується маршрутизації у WSN, споживання енергії не єдина проблема на розгляді. Такі параметри, як надійність, затримка, пропускна здатність або інші показники QoS, важливі при виборі маршрутизації. Ці заходи безпосередньо пов'язані з уникненням вузьких місць або збалансуванням навантаження і споживання для збільшення продуктивності та терміну служби вузлів та мережі. Уникнення вузьких місць залежить від транспортного навантаження, на яке, в свою чергу, впливає його балансування. Неправильний баланс призведе до нестабільних маршрутів, що додасть енергетичне навантаження на датчики вузлів і потенційно погіршить стан мережі. Іншим наслідком неправильного балансування навантаження є перегородження мережі на декілька сегментів. Через ці енергетичні обмеження, протокол Динамічної маршрутизації джерел (DSR) більше підходить з точки зору меншої щільності споживання енергії.

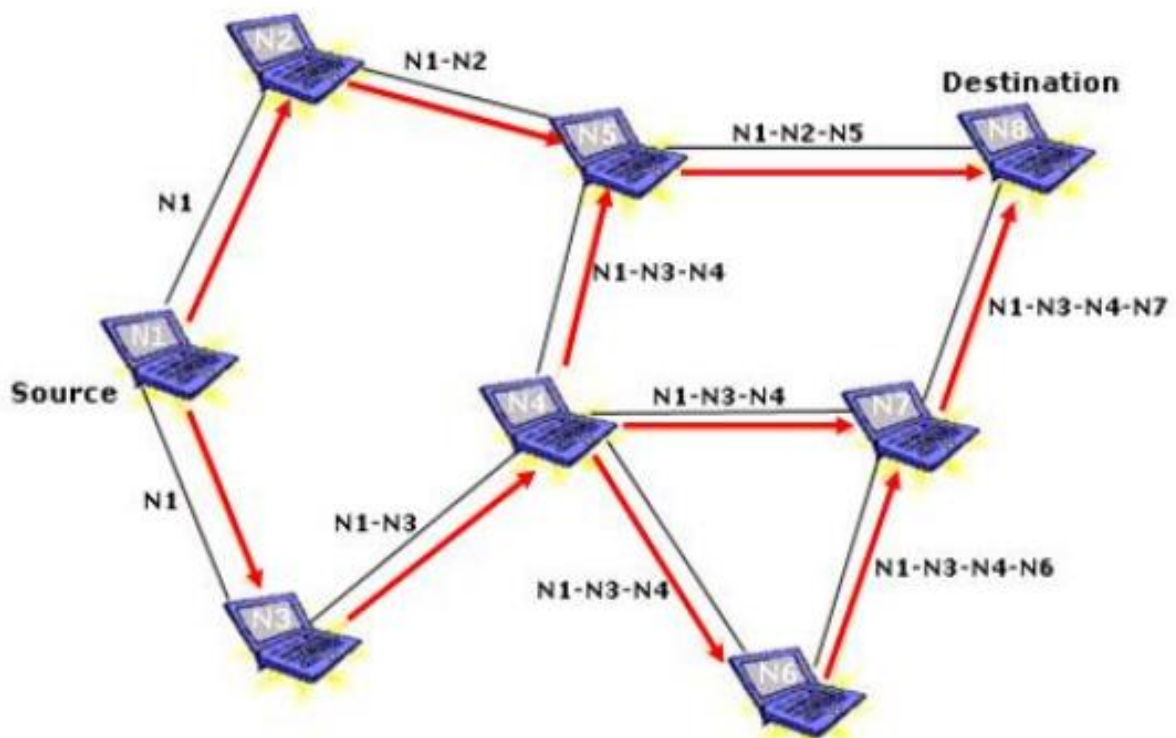


Рис. 1.2 Дослідження DSR маршруту

1.3 Варіанти ініціалізації передачі даних

Ініціалізація протоколу маршрутизації є функцією архітектурної моделі, оскільки сенсорні мережі розглядаються різними архітектурними та дизайнерськими обмеженнями. Для стабільності маршруту важливими факторами оптимізації є енергія та пропускна здатність. Існують різні установки, які використовують мобільні датчики де більшість частин датчиків мережевої архітектури вважаються нерухомими. Розгортання вузла впливає на продуктивність протоколу маршрутизації і це залежить від самої програми. Розгортання може бути як самоорганізованим, так і детермінованим. У системах самоорганізації інфраструктура створюється спеціально, а вузли датчиків розкидаються випадковим чином. У детермінованих ситуаціях дані передаються за заздалегідь визначеними шляхами, а датчики розміщуються вручну. Положення головної частини кластера або низхідного датчика також має вирішальне значення з точки зору енергоефективності та продуктивності.

На процес налаштування маршрутів під час створення інфраструктури впливають енергетичні рішення. Якщо всі вузли знаходяться в безпосередній близькості від висхідної частини, пряма маршрутизація буде працювати досить добре. Але загалом маршрутизація мульти-стрибків стає неминучою, оскільки датчики розкидані випадковим чином по всій зоні. На протокол маршрутизації, особливо щодо стабільності маршруту та мінімізації споживання енергії, сильно впливає модель передачі даних. Сенсорний вузол в сенсорній мережі може бути асоційований різними функціональними можливостями. Вузол може бути призначений для такої спеціальної функції, як зондування, агрегація, ретрансляція, що безпосередньо залежно від програми. Як результат, енергія вузла може швидко витрачатись у разі одночасного задіяння трьох функціональних можливостей, і це є критичним аспектом у перспективі можливостей вузла. Для оптимізації передачі в сенсорних вузлах використовується агрегація даних, коли аналогічні пакети з декількох вузлів агрегуються. Для цього сенсорні вузли генерують значні надлишкові дані. У деяких програмах сенсорних мереж потрібен лише успіх

доставки повідомлень між пунктом призначення та джерелом. Інші потребують ще більш точного кінцевого результату. Вимогами доставки в режимі реального часу та максимізації мережі і її терміном служби є:

1. Доставка не в режимі реального часу: забезпечення доставки повідомлень є обов'язковим для всіх протоколів маршрутизації, а це означає, що протокол завжди повинен знаходити маршрут (якщо він дійсно існує) між комунікаційними вузлами.

2. Доставка у режимі реального часу: іноді потрібно, щоб повідомлення було доставлено у визначений час, інакше вміст інформації повідомлення зменшується або повідомлення стає непридатним після обмеженого часу. У будь-якому разі основною метою цих протоколів є затримка мережі для повного контролю. Середня кількість задач цих протоколів може бути оцінена за допомогою вимірювання часових обмежень та коефіцієнта доставки повідомлень.

3. Тривалість роботи мережі має вирішальне значення в системах, де програма повинна працювати якомога довше. Показник, який використовується для визначення терміну служби мережі, залежить від програми. У більшості протоколів передбачається, що кожен вузол є однаково важливим і в таких протоколах використовується або час до відпадання першого вузла, або середнє енергоспоживання вузлів. Але якщо вузли не однаково важливі, розумною метрикою може бути час, доки пріоритетний або останні вузли не відключаються.

1.4 Опис стеку протоколів на рівні вузла

Процес прогнозування у WSN здебільшого залежить від фізичних умов вузла датчика. Рішення прогнозування значною мірою базуються на апаратній частині. Після прогнозування відбувається процес маршрутизації. Далі вузол знаходить шлях для передачі даних датчика. Після цього вибирається маршрут і передаються дані. Через малий обсяг даних, що генеруються датчиком,

обробка не спричиняє навантаження на сенсорний вузол. Шляхи маршрутизації встановлюються одним із таких методів:

- 1) реактивний
- 2) ініціативний
- 3) гібридний

Обчислюванні проактивні протоколи визначають шлях та зберігають їх у таблиці в пам'яті кожного датчика, навіть до того, як вони знадобляться. Будь-які зміни слід поширювати по всій мережі. Оновлення таблиці маршрутизації для кожного датчика потребує великої кількості пам'яті та ресурсів, оскільки WSN може складатися з тисяч датчиків. У разі реактивних протоколів маршрути обчислюються лише тоді, коли їх оглядають. Гібридні протоколи поєднують характеристики як реактивних, так і активних протоколів.

Зазвичай протоколи маршрутизації WSN поділяються на три категорії: маршрутизація на основі ієрархії, маршрутизація на основі розташування та на рівні сегментів мережі. У протоколах, заснованих на ієрархічній основі, датчики виконують різні завдання. Масштабованість - головний сенсорний атрибут у дизайні таких мереж. Маршрутизація на основі ієрархії працює в двох режимах. Перший режим використовується для вибору заголовків кластерів (CH), а другий - для маршрутизації та ідентифікації конкретної події. Маршрутизації на основі місцезнаходження розташування датчиків використовується для маршрутизації даних. Більше того, інформація про розташування та інформація про положення необхідна для обчислення відстані між двома цими датчиками. Таким чином можна визначити середнє споживання енергії. Інформацію про місцеположення можна отримати за допомогою двох методик: перша методика - обчислити сусідній вузол, другий - географічне положення, наприклад за допомогою GPS. У сегментованому рівні маршрутизації, всі датчики поділяють однаковий набір завдань у мережі. Вибір датчиків для запиту може бути важким через відсутність глобального ідентифікатора поряд із випадковими розширеннями вузлів.

1.5 Оптимізація навантаження за допомогою балансування у WSN

Протокол кластеризації - це найпоширеніший алгоритм, орієнтований на тривалість роботи мережі, енергоефективність та врівноваження навантаження. Кластеризація пропонує масштабованість, мобільність та агрегацію даних. Агрегація даних - це поєднання пакетів даних з декількох датчиків в одному пакеті, використовуючи мінімальні, максимальні та середні значення даних або видалення дублікатів. Агрегація даних контролює завантаження мережі, що призводить до зменшення загальної кількості пакетів.

У алгоритмах кластеризації навантаження врівноважується за допомогою динамічного вибору СН, що забезпечує хороше врівноваження споживаної енергії сенсорних вузлів. За допомогою руху кластера СН, дані передаються всім сенсорним вузлам, що призводить до збалансованого споживання енергії протягом усього часу роботи датчика. Однак через використання переходу, СН, розташований поблизу низхідного датчика, повинен передавати більше трафіку, ніж інші СН, що створює такі проблеми, як вузькі місця та перевантаженість. В результаті, енергія найближчого СН втрачається раніше, ніж енергія інших вузлів. Уникнення заторів, прогнозування вузьких місць та збалансування навантаження є ключовими проблемами в WSN. Оптимізація вибору вузлів датчиків допомагає в управлінні перевантаженнями та полегшує балансування навантаження. Для прогнозування вузьких місць протягом усього життя мережі датчики контролюються за допомогою моніторингу ємності буфера та спостереженням використання каналу. З іншого боку, механізми управління перевантаженнями та запобігання перевантаженням можуть збільшити продуктивність мережі та врівноважити навантаження трафіку в маршрутизації з кількома стрибками.

1.6 Розгляд протоколів енергоефективної маршрутизації у кластерних системах WSN

Основними протоколами де використовується енергоефективна маршрутизація є:

1. Протокол передачі інформації за допомогою переговорів (SPIN) [1, 2];
2. Створення ієрархії кластеризації (LEACH) [3];
3. Маршрутизація на основі градієнта (GBR) [4];
4. Динамічна маршрутизація джерела (DSR) [5];
5. Енергоефективний збір даних в сенсорних інформаційних системах (PEGASIS) [6].

SPIN не може гарантувати повну доставку пакетів від головного вузла (CH) до низхідного. Більше того, SPIN потребує повних знань з топології. Також це протокол який орієнтований на достовірність даних, і низхідний вузол має бути обов'язковим для створення, передачі та повторного маршрутування пакетів нових даних. Метою проектування цього протоколу, була ефективність споживання енергії, що призвело до збільшення тривалості життя мережі. Для зменшення енергії Споживання, SPIN використовує стиснення та обробку інформації всередині мережі. Однак він має обмеження, спричинене значною дифузією, що призводить до високого рівня перевантаження. Крім того, кожен вузол утворює градієнт під час розповсюдження до всіх своїх сусідів. Ці градієнти - це шляхи, які використовуються для маршрутизації пакету. Однак вони надають обмежену інформацію в тому сенсі, що кожен вузол здатний розпізнавати лише той вузол який розташований поряд з ним.

Як результат, SPIN сприйнятливий до вузьких місць, що спричиняє неефективність споживання енергії. Сенсорні вузли з акумулятором (BPSN) можуть рідко зустрічатися через технічно цілі проектування, довгий термін експлуатації мережі та високої надійності. Направлена дифузія підходить для більшості застосувань, але є слабким місцем для програми у випадку коли є багато приймачів і опорних точок. Коли приймачі пов'язані один з одним, об'єм даних значно збільшується. Маршрутизація на основі радіантів - це модифікована версія цього протоколу. У цьому рішенні використовуються такі методи, як агрегація даних та управління перевантаженнями, для рівномірного балансування трафіку, що допомагає врівноважити

навантаження на сенсорні вузли i , таким чином, збільшує термін служби мережі. Алгоритм маршрутизації LEACH характеризується як ієрархічний і призначений для збору та прийому даних від та до низхідного вузла, який по суті виступає базовою станцією для спеціальних мереж.

Алгоритми PEGASIS та LEACH схожі. Вони обидва використовують алгоритм мульти-стрибку для маршрутизації, тоді як для переадресації до кінцевого вузла буде використаний лише єдиний сенсорний вузол. Кожен вузол є членом ланцюга для переадресації пакетів, що призводить до зменшення накладних витрат. При використанні динамічної кластеризації в PEGASIS, продуктивність збільшується втричі.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

В цьому розділі проаналізовані основні проблеми енергоефективності у мережах WSN. Ми визначили що енергоефективність залежить не лише від фізичних характеристик окремих компонентів системи чи мережі, а від вдалого вибору алгоритму маршрутизації мережі, її топології, протоколу передачі даних, та використання таких функцій як прогнозування даних.

Також ми розглянули основні архітектурні моделі мереж WSN та дійшли висновку, що для побудови власної енергоефективної бездротової сенсорної мережі доцільно використовувати протоколи кластеризації, що дасть змогу масштабувати нашу систему в режимі реального часу, робити її мобільною, та оптимізовано агрегувати отримані дані.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ У WSN

2.1 Досягнення компромісу використання енергії в бездротових сенсорних мережах

У цьому розділі представлені різні методи дослідження для досягнення компромісів між різними цілями в бездротових сенсорних мережах, включаючи економію енергії. Ці рішення класифіковані на три категорії: багатометричні (мультиметричні) протоколи, міжшаровий підхід та багатоцільова оптимізація.

2.1.1 Мультиметричний протокол

Як обговорюється в розділі 2.4, для декількох додатків потрібна оптимізація таких параметрів як затримка та безпека, зменшуючи при цьому енергоспоживання. Багатометричні протоколи використовують різні мережеві вимірювання для задоволення кількох потреб у застосуванні. Наприклад, останні протоколи маршрутизації, що стосуються конкретних програм, пропонують поєднувати енергоефективність із вимогами QoS [7]. Ці дослідницькі роботи враховують запаси енергії вузлів разом із спотворенням даних, швидкістю, помилок пакетів або стану вузла. Однак такий різновидовий протокол викликає нові проблеми. Зазвичай протоколи покладаються на вагову функцію різних показників, а коригування даних часто проводиться за методологією проб і помилок. Більше того, мультиметричні протоколи вимагають визначення вичерпних показників та їх підтримку у кожному вузлі, що створює додатковий обмін повідомленнями. Наприклад, якість посилання може бути оцінена лише статично за допомогою RSSI (індикація сили отриманого сигналу), LQI (посилання показники якості) або показника прийому пакетної швидкості який змінюються з часом. Таким чином, ці мають недоліки у вигляді додаткових накладних витрат, але з іншого боку, вони дозволяють вдосконалити адаптацію до змін стану мережі, оскільки рішення вузлів базуються на показниках, зміна яких відображає стан мережі.

Нижче представлено деякі багатометричні протоколи з енергоефективними міркуваннями:

1) Маршрутизація за допомогою ATSR[8] де рішення про маршрутизацію приймаються локально на основі вагової функції, яка враховує залишкову енергію сусідніх вузлів, їх розташування та довіру. Для оцінки рівня зношення сусіднього датчика використовується такі показники безпеки, таких як стан вузла, автентифікація та цілісність повідомлення для виявлення шкідливих вузлів. Протокол вимагає додаткових керуючих повідомлень для оцінки енергії сусідніх вузлів, а рівень довіри та ваги повинні бути відрегульовані для обміну безпекою та енергією.

2) ERTLD [9] – удосконалена маршрутизація в режимі реального часу з розподілом навантаження на вузли, де оптимальні рішення шляху переадресації приймаються на основі RSSI. ERTLD може доставляти пакети в терміни від кінця до кінця, підвищуючи гнучкість, оскільки це може уникнути проблеми маршрутизації пустих місць. Більше того, він має більш високий коефіцієнт доставки і споживає менше енергії, ніж сучасні рішення.

3) PEMuR [10] ієрархічний протокол маршрутизації який присвячений маршрутизації пакетів через стаціонарну WMSN, задовольняючи як енергоефективність, так і вимоги QoS. У цьому рішенні СН вибирає шлях до базової станції (BS), рівень енергії якої, що залишилася після передачі, буде найвищою серед усіх можливих шляхів. Якщо доступної пропускну здатності недостатньо, СН може вирішити скинути менш значні пакети відповідно до їх впливу на загальне псування даних. PEMuR добре підходить для програм спостереження, контролю руху та моніторингу стану здоров'я. Однак формування кластерів є централізованою процедурою, тому воно створює додаткові накладні витрати: кожен вузол надсилає інформацію про свою енергію та місце розташування до базової станції. InRout [11] вирішує вибір маршруту для промислових бездротових сенсорних мереж, щоб забезпечити високу надійність, враховуючи обмежені ресурси сенсорних вузлів. Рішення використовує Q-навчання для вибору найкращого можливого маршруту,

виходячи з поточних мережеских умов та налаштувань програми. Вузол вибере маршрут, який максимізує його успіх щодо коефіцієнта помилок пакетів (PER) та енергії вузла.

2.1.2 Міжшаровий підхід в кластерній системі

Було проведено багато досліджень для вирішення споживання енергії на всіх шарах, особливо в мережі, MAC та фізичних шарах. Очікується, що інтегрована міжшарова конструкція може значно підвищити енергоефективність, а також адаптованість до динамічних середовищ. Дійсно, міжшарові рішення використовують взаємодію між різними шарами для оптимізації роботи мережі, як було обстежено у [11] та [12]. Вимоги до датчиків (QoS, маршрутизація, термін експлуатації, безпека тощо) тісно пов'язані між собою і потребують всебічного вивчення існуючих компромісів. Різностарові рішення дозволяють вирішити взаємозалежність цих проблем. В якості конкретного прикладу можна відстежувати рівень акумулятора на фізичному рівні і використовувати цю інформацію на рівні MAC для справедливого призначення слотів зв'язку для вузлів. Аналогічно можна розглянути графік перешкод при маршрутизації даних для оптимізації передачі затримка. Зміни топології, ймовірно, відбудуться у WSN та можуть скористатися підходом міжшарового рівня. Наприклад, після додавання чи видалення вузла змінюється щільність мережі та кількість перешкод на фізичному рівні. Таким чином, може знадобитися перерозподіл слотів або відповідна зміна на рівні MAC, створюючи різні можливості для вибору шляху на сегменті маршрутизації. В спільній маршрутизації, протоколів MAC та фізичному рівні, для розподілу енергії в кооперативних мережах датчиків зв'язку під заданою швидкістю пакетної помилки (PER C_{uomo} та ін. [12]) пропонують енергоефективний алгоритм вибору координатора PAN у сенсорних мережах на базі IEEE 802.15.4 Вони поєднують процедуру формування мережі, визначену на рівні MAC, з алгоритмом реконфігурації топології, що працює на мережевому рівні. За рахунок мінімізації висоти їхнього кластеру алгоритм може зменшити затримку і продовжити термін

служби мережі. Almalkawi та ін. [13] пропонують вигляд мережі між сегментами маршрутизації та MAC. Їх протокол маршрутизації на основі кластерів врівноважує навантаження між вузлами, будуючи кілька шляхів, заснованих на силі сигналу та кількості стрибків. У протоколі MAC на основі TDMA голова кластера адаптивно призначає слоти активним вузлам на основі типу трафіку. Їх рішення зменшує споживання енергії та затримку, і досягає високих коефіцієнтів пропускної здатності та доставки пакетів, вибираючи шляхи з кращою якістю зв'язку та уникаючи зіткнень та перешкод.

2.1.3 Багатоцільова оптимізація

Багатоцільова оптимізація спрямована на оптимізацію одночасно декількох цільових функцій. Тим не менш, для нетривіальних проблем оптимізації (МОП) не існує єдиного рішення, яке одночасно оптимізує кожну цільову функцію. В цьому випадку, цільові функції суперечать один одному, і існує велика кількість не оптимальних для рішень. У багатоцільової оптимізації бажано отримати різноманітний набір кандидатських рішень, які відповідають різним компромісним точкам між крайніми рішеннями. Для досягнення багатоцільової оптимізації в бездротових сенсорних мережах декілька рішень використовують принципи еволюційного алгоритму або теоретичні підходи.

2.2 Лінія управління

Запропонований алгоритм, коли вузол датчика знає власне географічне розташування, використовуючи GPS, а також знає про всі місця своїх сусідніх датчиків. Крім того, кожен вузол знає місцеположення низхідного вузла. Удосконалена версія цього алгоритму пропонується у посиланнях, який використовує ємність буфера і порівнює буфер вузлів, що в свою чергу сприятиме уникненню перенавантажень. У інших дослідженнях для того, щоб використовувати багатополосну маршрутизацію, тобто балансування навантаження, пропонується збільшити пропускну здатність мережі. Більше того, запропонований алгоритм є гібридним методом, який виконує уникнення перевантажень із використанням удосконаленої маршрутизації. Він також нормалізує довжину черги та глибину кінцевого вузла від сенсорних вузлів.

Іншими словами, він підтримує таблицю маршрутизації для найменшої глибини або найкоротшого маршруту.

Запропонований справедливий метод спільної маршрутизації для гетерогенного перекритого WSN. Для збереження загальної енергії цей документ запровадив енергетичний пул і використовував спільний механізм пересилання пакетів, який виступає агентом справедливої співпраці. У посиланні [14], застосований алгоритм, керований додатком на основі вибору енергоефективних вузлів. Цей алгоритм представив розробку, керовану додатками, яка збільшує ресурс мережі та підтримує балансування навантаження через групування вузлів датчиків, що працюють за аналогічними програмами. Незважаючи на збільшення затримки, досягається поліпшення балансування навантаження та терміну експлуатації. Довідник [15] запропонував гібридний оптимізатор, орієнтований на природу WSN, де вони запровадили три багатоцільові моделі для етапу планування, а саме: модель з збалансованим навантаженням, модель інтерференції та модель потокової ємності. Вони представили метод, заснований на результатах дворічного дослідження. Сюди ввійшли 455 бездротових приладів для навантаження на енергію, а також сім маршрутизаторів, що врівноважують навантаження, які впроваджені в будівлю на один рік. Абдельхакім [15] запропонував енергоефективний алгоритм для використання в режимі чутливості до часу, використовуючи оптимальну топологічну конструкцію. Проаналізували ресурс мережі для BPSN та запропонували енергетично аналітичну модель. Deva та ін. [16] запровадили додатковий СН для альтернативного вибору шляху, що призводить до підвищення енергоефективності та пропускної здатності для WSN.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У цьому розділі надана класифікація рішень, запропонованих у літературі, для задоволення кількох цілей. Можливо виділити вищезгадані методи, засновані на гнучкості отриманих компромісів у часі. Під гнучкістю мається на увазі, що компроміс може змінюватися з часом, залежно від умов мережі. Наприклад, мультиметричні протоколи зазвичай встановлюють бажаний компроміс між вимогами на етапі встановлення параметрів. Перевага надається на вимогу того хто проектує мережу. З цієї причини, навіть якщо вимоги сильно різняться, компроміс вирішується раз і назавжди. На противагу цьому, рішення МОО досліджують різноманітні кандидатські рішення під час виконання, які представляють різні компромісні точки дизайнерського(з точки зору проектування) простору. Покоління за поколінням, політика поведінки розвивається і підлаштовується під мережеву динаміку. Між тим, очікується, що міжшарові підходи покращать ефективність роботи мережі, використовуючи взаємодію між сегментами. Недоліком є складність методу, що потребує хорошого розуміння взаємодії різних змінних.

В останнє десятиліття спостерігається поширення потенційних областей додатків бездротових сенсорних мереж. Ці додатки не обмежуються охороною здоров'я, життєдіяльність великого масштабу, промисловим процесом, орієнтованим на безпеку, моніторинг та загальнодержавні системи розумних мереж.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ У WSN

3.1 Алгоритм кластеризації Energy Efficient Credit-Based

Алгоритм кластеризації названий Energy Efficient Credit-Based використовує кандидатські вузли для передачі даних між нодами. Вузол ретрансляції забезпечує оптимальний маршрут для енергоефективності. Запропонований метод оптимізованого вибору маршрутизації з розподілом обов'язків між вузлами методом дифузійного направлення змінює плоску маршрутизацію на ієрархічну. Ця зміна продовжує досягати відповідного споживання енергії та використання вузлів, які не перебувають на шляху вихідних даних джерела. Це запобігає зменшенню марнотратству енергії. Насправді перетворення плоскої маршрутизації в ієрархічну маршрутизацію викликає умову методу спрямованої дифузії, де можливо надавати різні обов'язки для вузлів, виходячи з практичної політики, і ділити вузли на основі обов'язків. На початку, розподіл обов'язків відбувається на основі локальної кластеризації, і вузли змагаються за домінування. Після закінчення періоду, вузол, що має найбільшу енергію та найкраще географічне розташування, вибирається як головний вузол кластера. Якщо енергія нагадування головного вузла кластера менша, ніж пороговий рівень, він запровадить нову заміну вузла, і конкурентний вузол з максимальною енергією нагадування буде замінений попереднім СН. Це означає, що датчики з максимальною енергією нагадування вибираються як СН (рис. 3.1). Таким чином, датчик вибирає бездротову мережу з максимальною енергією нагадування як СН.

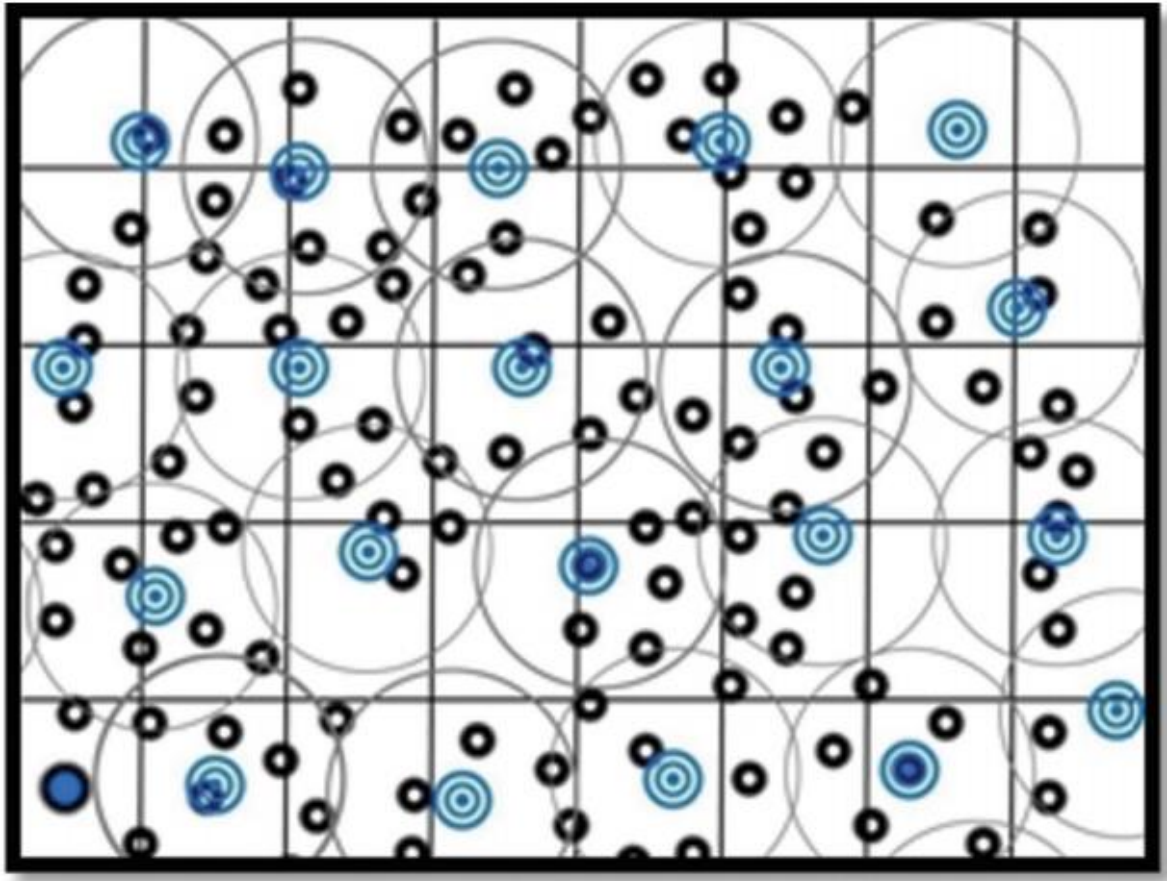


Рис. 3.1 Ілюстрація розташування та кластеризації мережевих вузлів

3.2 Алгоритм вибору датчика для удосконалення маршрутизації

Цей вибір може бути здійснений на основі рівняння (4.1) вибору альтернативного СН (рис. 4.1). Кожен бездротовий датчик з максимальним коефіцієнтом, відмінним від первинного СН вибирається як альтернативний СН.

$$CH_{R_f} = E_{Ni} - \log_{10}(d_{Ni} \text{ до первинного } CH) - \log_{10}(AVG_{D_{Ni}} \text{ до первинного } CH) \quad (3.1)$$

де E_{Ni} - енергія вузла-кандидата для заміни, d_{Ni} - до первинного вузла, CH(RF) - відстань між альтернативним вузлом до СН. $AVG_{d_{Ni}}$ показує затримку між альтернативним вузлом головним вузлом кластера. Коли вузол очікує зміну, створюється пакет з іменем події з визначеним терміном служби і він надсилається до СН. В цей момент СН відправляє виявлений пакет у відповідний вузол ретрансляції за допомогою визначеної функції, щоб надати відповідь низхідному вузлу. Дослідження стосуватиметься цього питання у наступній частині цієї магістерської дисертації. Є важливий момент у відправці пакету кластером тобто, якщо вузол знаходиться в обмеженому радіусі для передачі даних від СН або немає жодного ретрансляційного вузла, дані будуть повертатись безпосередньо у кінцевий вузол. В іншому випадку СН вибирає вузол з найбільшою кількістю можливих маршрутів як наступний хор (стрибок).

3.3 Вибір вузлів, що відповідатимуть за релейний зв'язок

Головна частина кластера (СН) вибирає найкращі вузли для передачі даних на основі оцінки радіусу відправлення. У цій роботі рівняння 4.2 використовується для вибору наборів кандидатських вузлів. За допомогою рівняння (2) оцінюється відстань між поточним вузлом та СН. Потім він віднімається від радіусу відправлення (x_s). Якщо результат знаходиться в межах попередньо визначеного порогу, вузол стає кандидатом на ретрансляцію. Деталі проілюстровані на малюнку 5. де C_i являє собою даний вузол.

$$C_N = \{C_i | \rightarrow |(d_{Node. до. СН} - x_s)| \leq \lambda \quad (3.2)$$

Відстань від вузла кандидата до низхідного вузла: Відстань між вузлом i до кінцевого позначається як d_{Ni} . Слід зазначити, що кожен вузол усвідомлює власні відстані до низхідного вузла. Зв'язок між відстанню та середнім споживанням енергії є зворотним, тобто більш віддалений вузол має більш високе середнє споживання енергії, що спричиняє більше затримок для встановлення суміжності з низхідним вузлом. Як видно на рисунку 3.2, вузол А знаходиться ближче до низхідного вузла, ніж вузол В.

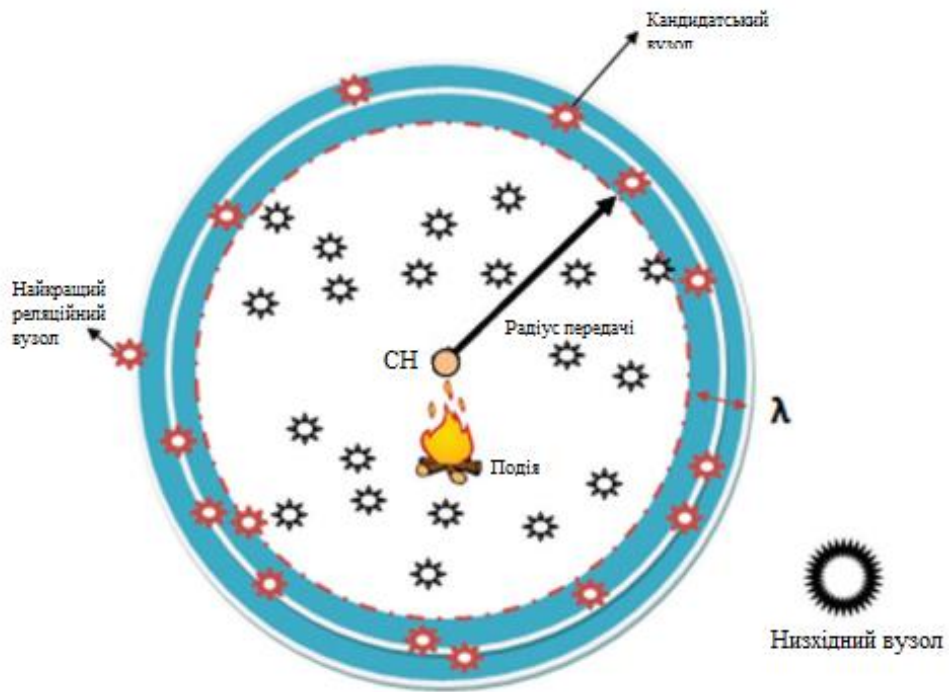


Рис. 3.2 Ілюстрація радіусу відправлення вузла та набору вузлів-кандидатів

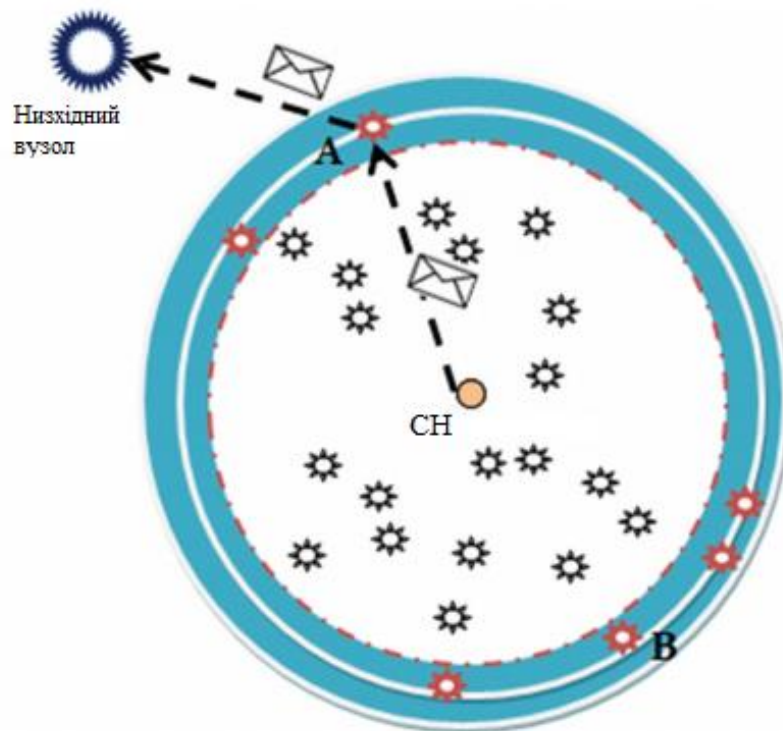


Рис. 3.3 Ефект відправлення відстані до вузла потоплення

Якщо для передачі обрано В, карта маршрутизації повністю зміниться, і низхідний вузол отримає пакет з більш високою затримкою. Відстань від вузла-кандидата до вузла-відправника: d_{Ni} . Решта енергії в вузлі кандидата: E_R - залишок енергії.

Наявний простір у буферній пам'яті обчислюється за допомогою рівняння (3.3).

$$M_F = M_t - M_e \quad (3.3)$$

де M_F - наявний буфер, M_t - загальна ємність буфера, а M_e - існуючі дані в буфері.

Затримка в кінці розраховується за допомогою рівняння (3.4).

$$D_{end-end} = (D_{trans} + D_{prop} + D_{proc}) \quad (3.4)$$

де $D_{end-end}$ - затримка від кінця до кінця, D_{trans} - затримка передачі, тоді як D_{prop} і D_{proc} - затримка поширення і запізнення процесу відповідно.

Відношення помилки до успіху в кожному часовому періоді є ще одним параметром для розпізнавання відповідного вузла. У цій статті використовується самоперемінна пам'ять для кожного вузла датчика, яка називається S_{li} .

Кожна успішна передача призводить до одиничного збільшення суми S_{li} . Коефіцієнт успіху чи невдачі може бути розрахований за допомогою рівняння (3.5).

$$S_s = \left(\frac{\sum S_{li}}{\sum N_i} \right) * 100 \quad (3.5)$$

Вибір вузла здійснюється за допомогою рівняння (4.6). На малюнку 4.6 показано крок за кроком цей офлайн-процес:

$$F_i = E_{Ri} + \alpha_1 \log d_{Ni. до sin k} - \alpha_2 \log d_{Ni. до .CH} - \alpha_3 \log M_F - \alpha_4 \log D_{end-end} - \alpha_5 \log S_s \quad (3.6)$$

F_{max} - обраний вузол

Процес вибору маршруту залежить від вибору релейного вузла. Після вибору утворюється K_{ij} , де i номер вузла, а j - номер СН. Цей процес повторюється для всіх інших вузлів. Кожен релейний вузол вибирається з набору кандидатських вузлів. Датчик R_i визначає об'єкт призначення O_i , якщо він є одним із кандидатських ретрансляційних вузлів. Рівняння (3.7) показує двійкову модель вибору маршруту.

$$\text{Route}(s) \leftarrow \begin{cases} 1, & F(R_i, O_i) \leq r \\ 0, & F(R_i, O_i) > r \end{cases} \quad (3.7)$$

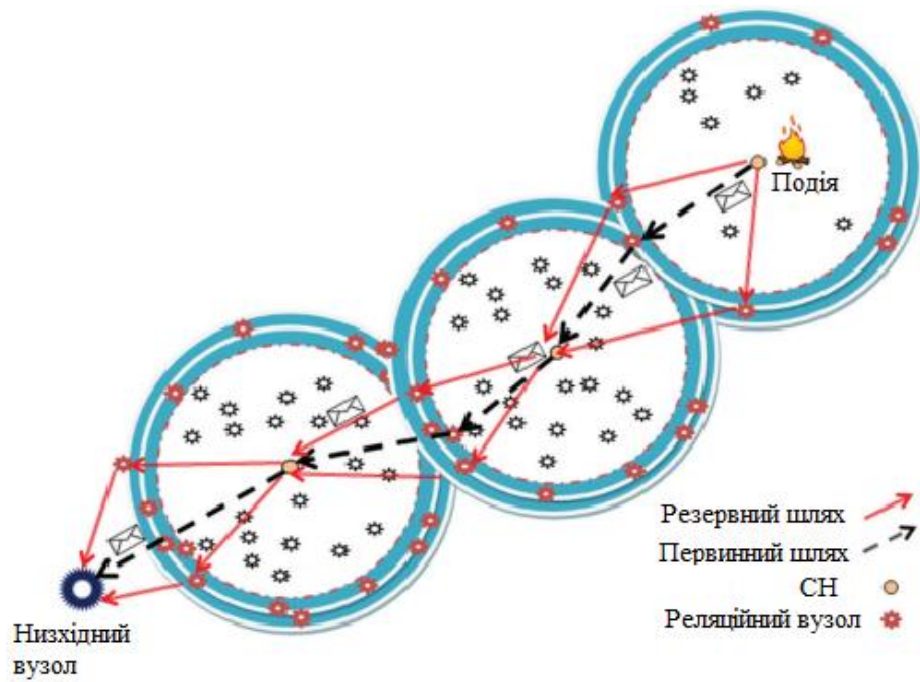


Рис. 3.4 Карта маршрутизації шляхом кластеризації та вибору оптимального релейного вузла

де F - функція вибору для вузла ретрансляції R_i , чутливий цільовий об'єкт O_j і r - радіус відправлення. Коли цільовий об'єкт включений, маршрутна функція (s) маршруту дорівнює 1, в іншому випадку, дорівнює 0.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

У цьому розділі ми розглянули удосконалений алгоритм кластеризації Energy Efficient Credit-Based який базується на ієрархичній маршрутизації. Завдяки розподіленню вузлів на ролі, такі як наприклад кандидатські чи реляційні та використанні ієрархічної маршрутизації досягається оптимальне споживання енергії. Використовуючи особливості цього алгоритму ми зможемо передавати дані від джерела до клієнта по найбільш оптимальному маршруту, з мінімальними затримками, та навіть використовувати прогнозування даних. При цьому марнотратство енергії буде зведено до мінімуму.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ВИБОРУ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ WSN

У цьому розділі представлено нову енергоефективну архітектуру для моніторингу стану здоров'я, де датчики надсилають дані в основному через мобільний телефон користувача, але вони мають можливість надсилати дані до точок доступу, коли вони доступні в середовищі користувача. Завдання запропонованих стратегій - позбавити унікальну базову станцію від прийому всіх даних, а це дає можливість вузлам сенсорів вибрати найкращу технологію зв'язку з точки зору енергоспоживання. На відміну від існуючих підходів, це рішення дозволяє оптимізувати термін служби як датчиків, так і базової станції. Результати моделювання показують, що запропонований підхід покращує енергоефективність системи порівняно з традиційними архітектурами, де основні датчики можуть спілкуватися лише з мобільним телефон користувача.

4.1 Огляд існуючих алгоритмів

Як було розглянуто в попередньому розділі, було запропоновано багато рішень для економії енергії в мережах, пов'язаних зі здоров'ям. Серед них можна навести мінімальний вибір підмножини датчиків [17], деактивацію датчиків, що відчують потужність, адаптаційна частота дискретизації [18], зниження комунікацій [19] та обмін ресурсами. Однак, ці роботи, як правило, зацікавлені в споживанні енергії датчиків, але ніколи не враховують, що базова станція також може бути обмежена енергією. Традиційно потужний ноутбук виступав в якості базової станції, але для розгляду мобільності більшість робіт зараз вважають мобільний телефон базовою станцією. Хоча сучасні телефони є більш потужними пристроями порівняно з датчиками - носіями, проте вони також стикаються з проблемами споживання енергії [20].

Вважається, що архітектури розпізнавання активності можуть скористатися поширенням розумних пристроїв (телефонів, планшетів, ноутбуків) та їх щоденним використанням, щоб збалансувати навантаження серед декількох базових станцій. Наприклад, вдома та в офісі датчики тіла

можуть надсилати свої дані до ноутбука чи точки доступу. На відкритому повітрі мобільний телефон або планшет можуть приймати дані в залежності від їх доступності. Переваги цієї стратегії двоякі. По-перше, це заважає унікальній базовій станції отримувати всі дані. По-друге, коли датчики оснащені декількома радіоприймачами, це дозволяє вибрати найкращу технологію зв'язку в залежності від наявних з'єднань. Дійсно, різні радіостанції можуть мати різні профілі продуктивності з точки зору споживання енергії, зони покриття, пропускної здатності та якості зв'язку.

У цьому розділі пропонується нова архітектура для мереж з метою економії енергії як на датчиках, так і на мобільних пристроях. Вважається, що датчики, оснащені Bluetooth та ZigBee-інтерфейсами зв'язку, наприклад датчики SHIMMER [21]. Припускається, що датчик завжди може надсилати свої дані на мобільний телефон користувача через Bluetooth, але іноді точка доступу ZigBee доступна в середовищі користувача. Наша мета - привілейовувати комунікації ZigBee, оскільки вони менш енерговитратні для датчиків, і за цей проміжок часу мобільний телефон може вимкнути свій інтерфейс Bluetooth, заощаджуючи таким чином енергію. У нашому рішенні датчики повинні регулярно проводити тести – для вибору мережевого інтерфейсу (NIS) - щоб перевірити, чи доступна точка доступу ZigBee. Так само мобільний телефон повинен регулярно проводити тести – Bluetooth - сканування, щоб виявити, чи повинен сенсор спілкуватися з ним, коли немає доступної точки доступу ZigBee.

Представлена енергоефективна архітектура для переносних сенсорних мереж, дозволяє оптимізувати термін служби як датчиків, так і мобільного телефону. Також запропоновано три стратегії ефективного впровадження цієї архітектури: фіксований, адаптивний та підхід на основі SMS. Ці рішення визначають, коли слід проводити тести на датчиках та мобільному телефоні, щоб використовувати енергоефективність для затримки. Також промодельована та проаналізована затримка різних запропонованих стратегій. Також була порведена оцінка рішень за допомогою симуляцій в яких

порівнено їх ефективність з довідковою архітектурою, де датчики можуть передавати свої дані лише на мобільний телефон, як у [17, 18,19].

4.2 Пов'язані проекти

Датчики та мобільні телефони часто оснащені багатьма мережевими інтерфейсами, такими як ZigBee, Bluetooth, WiFi та 3G. Кожна технологія зв'язку має різні характеристики з точки зору наявності пропускної здатності, площі покриття, економічних витрат та енерговитрат. Таким чином, необхідно ефективно вибрати мережевий інтерфейс, щоб продовжити термін експлуатації мобільного пристрою. Цей вибір залежить від можливостей оточення, тобто від наявних підключень та вимог застосування (пропускна здатність, якість зв'язку, енергія).

Існуючі науково-дослідні роботи зацікавлені у виборі найкращого мережевого інтерфейсу (Wi-Fi/стільникової мережі) з точки зору енергоспоживання. Дійсно, 3G споживає вдвічі більше енергії, ніж Wi-Fi-з'єднання, але мережі 3G мають більш широкі сфери обслуговування. Таким чином, мобільний пристрій повинен якомога більше спілкуватися в Wi-Fi. Кім та ін. [20] пропонує адаптувати інтервал між двома виборами мережевого інтерфейсу. Це пояснюється тим, що часті вибори мережевого інтерфейсу споживають енергію на пристрої телефону для сканування Wi-Fi для виявлення точки доступу, в той час як це скорочує час зв'язку через 3G. Автори показують, що їх рішення покращує енергоефективність на 15% порівняно з випадком, коли телефон використовує лише 3G. Rhamati та Zhong [21] пропонують оцінити наявність Wi-Fi без включення інтерфейсу, оскільки вартість енергії для встановлення зв'язку дуже висока. Вони пропонують різні політики вибору залежно від часу, історії, умов мережі (доступна точка доступу, потужність сигналу) та руху пристрою. Експерименти демонструють, що таким підходом можна досягти 35% покращення терміну служби акумулятора[21]. Paschou та ін. [22] вибирали найбільш підходящу технологію передачі даних, яка буде використовуватися (WiFi, 3G, SMS) з точки зору економічних витрат для користувача, залежно від обсягу та типу даних про

охорону здоров'я, що надсилаються. Припускається, що взаємні та перехресні технологічні втручання можуть виникати тоді, коли інші бездротові комунікації, такі як Bluetooth, Wi-Fi або ZigBee, тривають у середовищі користувача [21, 22]. Питання перешкод виходять за межі цього дослідження, але наша архітектура є достатньо відкритою для інтеграції існуючих методів пом'якшення перешкод. Наприклад, у роботі [23] автори формулюють оптимізаційну задачу для віднесення каналів Wi-Fi та ZigBee до подвійних радіопристроїв, щоб взаємні та перехресні перешкоди технологій були мінімізовані.

4.3 Загальна ідея проекту

У запропонованій архітектурі ми вважаємо, що пацієнт оснащений датчиком, який стежить за станом його здоров'я. Ми припускаємо, що датчик завжди може підключати та передавати свої дані на смартфон пацієнта через Bluetooth. Ми також вважаємо, що датчик може підключатися до базової станції ZigBee, доступ до якої можливий лише в деяких середовищах, наприклад, вдома або в офісі. Ці базові станції можуть бути ноутбуками або ПК, оснащеними приймачем ZigBee. Потім мобільний телефон і точки доступу ZigBee можуть передавати дані на віддалений сервер, який централізує дані. Ця архітектура проілюстрована на рисунку 4.1. Таким чином, Bluetooth розглядається як первинна бездротова мережа з високою доступністю, тоді як використання ZigBee обмежене покриттям певних точок доступу. Як правило, ZigBee споживає менше енергії, ніж Bluetooth. Більше того, коли датчик передає свої дані до точки доступу ZigBee, смартфон може вимкнути свій інтерфейс Bluetooth і тим самим економити енергію. Таким чином, якщо ZigBee доступний замість Bluetooth у певній області, датчики будуть спілкуватися через інтерфейс ZigBee, щоб зменшити енерговитрати на передачу даних та звільнити смартфон від підключення на деякий час. Ми вважаємо, що точки доступу не обмежені енергією. Тому вони періодично транслюють маяки, щоб датчик міг виявити точку доступу, прослуховуючи носій. Щоб використовувати інтерфейс ZigBee, датчик повинен перевірити

наявність ZigBee та здійснити вертикальну передачу передачі від Bluetooth на ZigBee. Отже, датчику необхідно здійснювати періодичний вибір мережевого інтерфейсу, щоб виявити, чи є точка доступу ZigBee. Коли датчик спілкується з точкою доступу, смартфон може вимкнути Bluetooth-зв'язок та заощадити енергію. Коли зв'язок ZigBee закінчується, датчик ставить себе у відкритому режимі, щоб мобільний телефон міг ініціювати сеанс Bluetooth. Однак мобільний телефон не знає профілю доступності ZigBee. Ось чому мобільний телефон повинен періодично виконувати сканування Bluetooth, щоб виявити, чи датчик готовий спілкуватися з ним. Наприкінці відбудеться послідовне з'єднання ZigBee та Bluetooth на датчику. Мережевий цикл визначається як сеанс Bluetooth з подальшим періодом зв'язку Zigbee.

В роботі пропонується наступні три стратегії для мобільного телефону для виявлення датчика та / або датчика для виявлення точки доступу ZigBee.

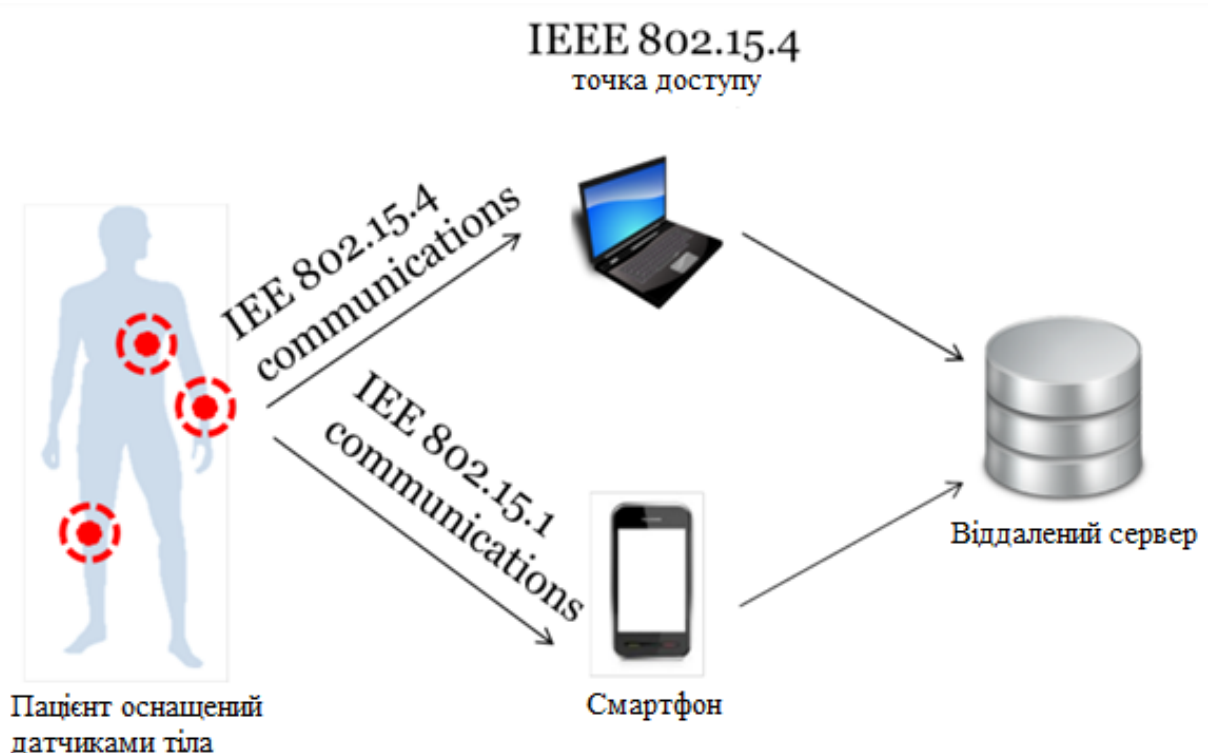


Рис. 4.1 Розглянута архітектура

4.3.1 Фіксований підхід

Спочатку ми припускаємо, що інтервал сканування Bluetooth δ_{scan} та інтервал вибору мережевого інтерфейсу δ_{NIS} є постійними. Позначимо це рішення EENIS (вибір енергоефективного мережевого інтерфейсу) і

проілюструємо його поведінку на малюнку 4.2. В першу чергу датчик спілкується з мобільним телефоном і перевіряє кожні δ_{NIS} секунди, чи є точка доступу ZigBee (1). Коли датчик виявить, що ZigBee доступний, він надсилає свої дані до точки доступу (2). У той час телефон більше не отримує даних: він вимикає інтерфейс Bluetooth і переходить у сплячий режим (3). Потім він періодично виконує сканування Bluetooth, щоб виявити, чи хоче датчик спілкуватися з ним (4). Згодом, коли користувач рухається, точка доступу ZigBee стає недоступною, таким чином датчик переходить у режим виявлення для того, щоб його виявив телефон (5). Мобільний телефон виявить датчик при наступному скануванні Bluetooth, і він ініціює зв'язок Bluetooth з датчиком: починається новий мережевий цикл (6).

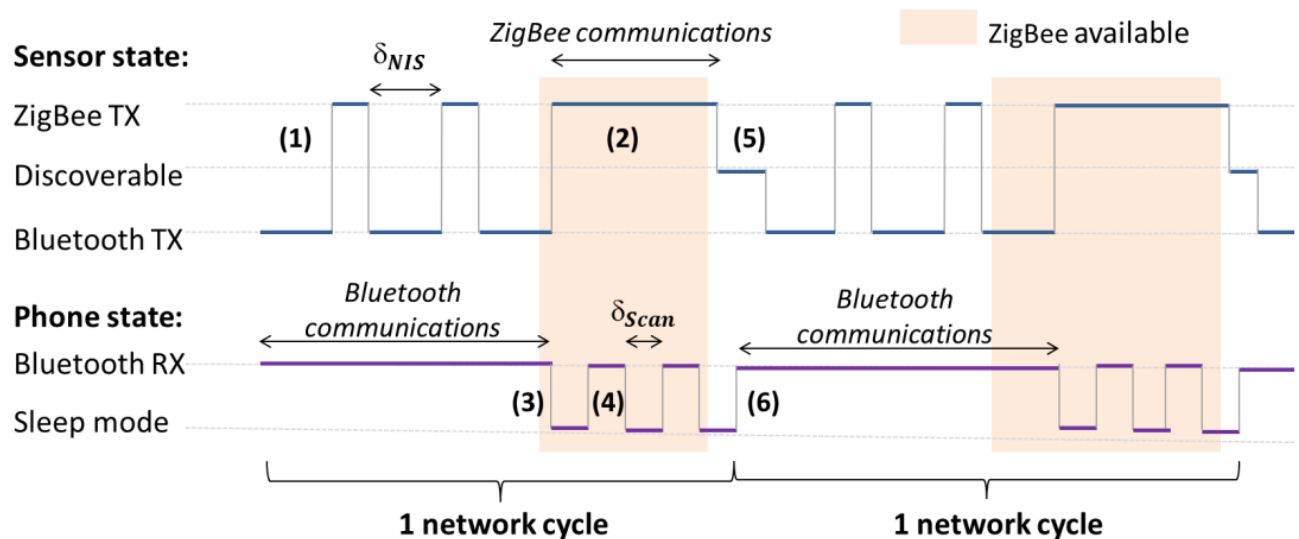


Рис. 4.2 Ілюстрація поведінки рішення EENIS

4.3.2 Адаптивний підхід

Інтервал сканування Bluetooth δ_{scan} та інтервал вибору мережевого інтерфейсу δ_{NIS} є критичними параметрами, оскільки вони сильно впливають на споживання енергії смартфона та датчика відповідно. Дійсно, часте сканування Bluetooth є енерговитратним для смартфона, оскільки потужність, яка використовується, коли мобільний телефон виконує пошук пристрою, не є незначною. Таким чином, режим сканування Bluetooth є дуже енерговитратним і його слід обережно використовувати. У той же час часті сканування Bluetooth зменшують затримку, оскільки, коли датчик чекає його

виявлення, він не може надсилати дані. Так само на частоті вибору мережевого інтерфейсу на частоті вибору мереж витрачається багато енергії для відключення/включення радіостанцій, але це дозволяє скоротити час, проведений в Bluetooth, коли точки доступу ZigBee виявляються швидше. Тому існує компроміс між частими виборами мережевого інтерфейсу та зменшенням передачі через Bluetooth. У адаптивному підході датчики та мобільний телефон оцінюють доступність ZigBee, щоб пристосувати інтервал між двома тестами до мережевих умов.

4.3.3. Підхід на основі SMS

У фіксованому та адаптивному підходах, коли точка доступу ZigBee вже недоступна, а інтерфейс Bluetooth мобільного телефону все ще вимкнено, може спостерігатися велика затримка доставки пакетів. Щоб вирішити цей недолік, ми пропонується рішення на основі SMS: віддалений сервер виявляє, коли датчик більше не підключений до точки доступу ZigBee (оскільки він деякий час не отримує даних) та надсилає SMS на мобільний телефон пацієнта. Після отримання текстового повідомлення мобільний телефон вмикає свій інтерфейс Bluetooth та ініціює з'єднання, не потребуючи втручання з боку користувача. Переваги цієї стратегії двоякі:

- По-перше, це рішення заощаджує енергію мобільного телефону, оскільки мобільний телефон виконує сканування Bluetooth лише за потреби, тим самим довше перебуваючи в режимі сну.
- По-друге, затримка обмежується часом, необхідним сервером для надсилання SMS. У [22] професор Дондик виміряв, що для передачі сповіщення на мобільний телефон в середньому потрібно 9,8 секунди, що може бути розумною затримкою для деяких програм охорони здоров'я.

4.3.4 Адаптивна стратегія

У адаптивній стратегії датчик та мобільний телефон дізнаються про наявність ZigBee та обчислюють оптимальний інтервал між двома тестами. З боку датчика, його мета полягає у визначенні оптимального інтервалу вибору мережевого інтерфейсу δ_{NIS}^* , який досягає компромісу між споживанням

енергії завдяки зв'язку Bluetooth та додатковим споживанням енергії за рахунок вибору мережевого інтерфейсу. Що стосується телефону, його мета полягає у визначенні оптимального інтервалу сканування Bluetooth δ_{scan}^* , який пропонує компроміс між додатковим споживанням енергії завдяки процедурам виявлення Bluetooth та затримкою, що вводиться, коли датчик чекає його виявлення.

Можливо змодельовати стан доступності ZigBee за допомогою двоканального ланцюга Маркова [19], як показано на малюнку 6.3. Тут λ позначає швидкість переходу стану ZigBee з недоступного в доступний стан, тоді як μ - швидкість переходу стану з наявного стану в недоступний стан. Ми моделюємо схеми використання Bluetooth та ZigBee за допомогою безперервного процесу Маркова. І λ , і μ можуть змінюватися залежно від мережевого середовища та мобільності користувача.

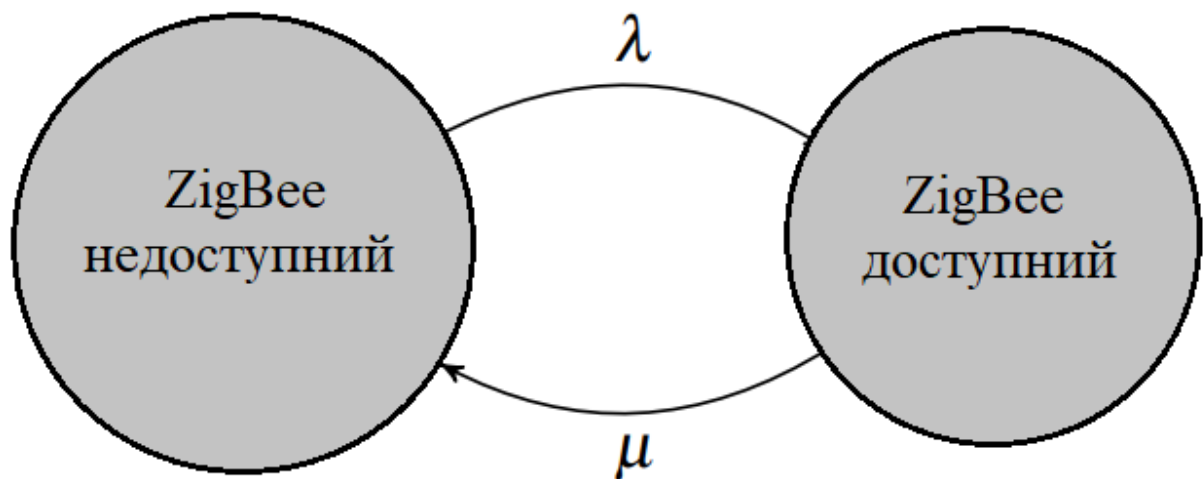


Рис. 4.3 Діаграма двох станів доступності ZigBee

Для того, щоб визначити оптимальні інтервали δ_{NIS}^* та δ_{scan}^* , нам потрібно моделювати енергоспоживання приладів, що функціонують від наявності ZigBee. Ми використовуємо позначення, зведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Позначення та описи, що використовуються для моделювання споживання енергії

Позначення	Значення
λ	Швидкість переходу стану ZigBee з недоступного до доступного стану.
	Швидкість переходу стану ZigBee з доступного стану в недоступний стан.
$E[T_{BT}]$	Очікуваний час використання Bluetooth протягом одного мережевого циклу датчика та телефону.
$E[T_{Zig}]$	Очікуваний час використання ZigBee протягом одного мережевого циклу датчика.
$E[T_{снy}]$	Очікуваний час сну мобільного телефону протягом одного мережевого циклу.
e_{BT}	Вартість енергії на датчику для передачі даних байтами через Bluetooth (Дж/байт).
e_{Zig}	Вартість енергії на датчику для передачі даних байтами через ZigBee (Дж/байт).
e_{NIS}	Вартість енергії на датчику для однієї операції вибору мережевого інтерфейсу.
e_{Scan}	Вартість енергії на мобільному телефоні на одну операцію сканування Bluetooth.
	Очікувана середня кількість даних, що передаються датчиком (байт/с).

$TC_{\text{Сенсор}}$	Загальне споживання енергії датчика протягом одного мережевого циклу.
TC_{TX}	Загальне споживання енергії на датчику за рахунок передач протягом одного мережевого циклу.
TC_{NIS}	Загальне енергоспоживання датчика, витраченого на операції з вибору мережевого інтерфейсу протягом одного мережевого циклу.
TC_{Scan}	Загальне споживання енергії мобільного телефону для операцій сканування Bluetooth за один мережевий цикл.
δ_{NIS}	Інтервал вибору мережевого інтерфейсу (сек).
δ_{Scan}	Інтервал сканування Bluetooth (секунди).
$P_{\text{успіх}}(\delta_{NIS})$	Ймовірність того, що результат вибору мережевого інтерфейсу буде успішним при використанні інтервалу δ_{NIS} .
$P_{Scan_{succ}}(\delta_{Scan})$	Ймовірність того, що результат сканування Bluetooth буде успішним при використанні інтервалу δ_{Scan} .
$E[N(\delta_{NIS})]$	Очікувана кількість операцій вибору мережевого інтерфейсу, виконаних датчиком протягом одного мережевого циклу при використанні інтервалу δ_{NIS} .
$E[N_{Scan}(\delta_{Scan})]$	Очікувана кількість операцій сканування Bluetooth, здійснених мобільним телефоном протягом одного мережевого циклу при використанні інтервалу δ_{Scan} .

4.3.5 Підхід зі сторони датчика

Загальне споживання енергії датчика $TC_{\text{Сенсор}}$ складається з енергії, яка використовується для передачі даних та енергії, витраченої під час періодичного вибору мережевого інтерфейсу.

$$TC_{\text{Сенсор}} = TC_{\text{ТХ}} + TC_{\text{NIS}} \quad (4.1)$$

Ми визначаємо випадкові величини $E[T_{\text{BT}}]$ і $E[T_{\text{Zig}}]$ відповідно як очікуваний час використання датчика Bluetooth та ZigBee протягом одного мережного циклу. Ми визначаємо випадкові величини $E[T_{\text{BT}}]$ і $E[T_{\text{снУ}}]$ як очікуваний час використання Bluetooth та режиму сну телефону протягом одного мережного циклу. $E[T_{\text{Zig}}]$ і $E[T_{\text{снУ}}]$ являє собою ту саму змінну, оскільки телефон не активний, коли датчик надсилає свої дані до точки доступу ZigBee. Однак позначити датчик і телефон зручно в наступному.

e_{BT} (відповідно e_{Zig}) позначає енерговитрати на передачу даних в байтах через Bluetooth (відповідно через ZigBee). $E[AR]$ являє собою очікуваний середній обсяг даних, який повинен передавати датчик в (байт/с). Таким чином, ми можемо обчислити споживання енергії датчика для передачі даних наступним чином:

$$TC_{\text{ТХ}} = (e_{\text{BT}} * E[T_{\text{BT}}] + e_{\text{Zig}} * E[T_{\text{ZIG}}])E[AR] \quad (4.2)$$

Датчик здійснює періодичний вибір мережевого інтерфейсу, щоб виявити, чи доступна точка доступу ZigBee. Результат кожного вибору мережевого інтерфейсу - або успіх, або невдача. Ми вважаємо, що відбувається збій, коли немає доступного ZigBee, тому Bluetooth повинен бути використаний. Існування точки доступу ZigBee вважається успішною. Коли відбувається успішний вибір бездротового інтерфейсу, здійснюється вертикальна передача даних від Bluetooth до ZigBee. Кожен вибір мережевого інтерфейсу - це проба Бернуллі. Ймовірність того, що ZigBee перебуває у

доступному стані через t секунд, враховуючи, що він був недоступний, може бути обчислений імовірністю перехідного стану безперервного процесу Маркова, вираженою в (4.3):

$$P[\text{ZigBee} \in \text{доступною після } t \text{ секунд} \mid \text{недоступною}] = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (4.3)$$

Використовуючи δ_{NIS} як інтервал вибору мережевого інтерфейсу, ймовірність успішного вибору мережевого інтерфейсу:

$$P_{\text{успіх}}(\delta_{NIS}) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)\delta_{NIS}} \quad (4.4)$$

Таким чином, з урахуванням $P_{\text{успіх}}(\delta_{NIS})$ очікувана кількість виконуваних операцій вибору мережевого інтерфейсу $E[N(\delta_{NIS})]$ становить:

$$E[N(\delta_{NIS})] = \frac{1}{P_{\text{успіх}}(\delta_{NIS})} \quad (4.5)$$

Очікуваний час використання Bluetooth $E[T_{BT}]$ протягом одного мережного циклу можливо обчислити використовуючи $E[N(\delta_{NIS})]$ та δ_{NIS} .

$$E[T_{BT}] = E[N(\delta_{NIS})] * \delta_{NIS} \quad (4.6)$$

Очікуваний час використання ZigBee $E[T_{Zig}]$ протягом одного мережевого циклу задається:

$$E[T_{Zig}] = \frac{1}{\mu} \quad (4.7)$$

$TC_{NIS}(\delta_{NIS})$ позначає енерговитрати на вибір бездротового інтерфейсу під час вибору іншого мережевого інтерфейсу. Коли δ_{NIS} використовується як інтервал, загальне споживання енергії вибору мережевого інтерфейсу протягом одного мережевого циклу може бути обчислено через (4.8).

$$TC_{NIS}(\delta_{NIS}) = e_{NIS} * E[N(\delta_{NIS})] \quad (4.8)$$

Оптимальний інтервал δ_{NIS}^* - це інтервал, що мінімізує споживання енергії датчика, тобто $\delta_{NIS}^* = \arg_{\delta_{NIS}} \min TC_{\text{Сенсора}}(\delta_{NIS})$.

4.3.6 Підхід з сторони телефону

Ми визначаємо збій та успішність операції сканування Bluetooth з мобільного телефону. Ми вважаємо, що помилка виникає, коли датчик передає дані до точки доступу ZigBee, тобто коли ZigBee доступний, оскільки

мобільний телефон не розпізнає датчик під час сканування. Коли немає доступної точки доступу ZigBee, це вдалий випадок, оскільки датчик буде чекати, коли його виявить телефон. Використовуючи δ_{scan} як інтервал сканування Bluetooth, ймовірність того, що сканування буде успішною після δ_{scan} секунд, враховуючи, що останній тест виявився невдалим (тобто ймовірність того, що ZigBee недоступна після δ_{scan} секунд, враховуючи, що ZigBee був доступний), можна обчислити наступним чином.

$$P_{Scan_{succ}}(\delta_{scan}) = P[\text{ZigBee недоступний після } \delta_{scan} \text{ секунд} \mid \text{доступний}] \\ = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)\delta_{scan}} \quad (4.9)$$

З рівняння (6.9) очікувана кількість виконаних операцій сканування Bluetooth становить:

$$E[N_{Scan}(\delta_{scan})] = \frac{1}{P_{Scan_{succ}}(\delta_{scan})} \quad (4.10)$$

З рівняння (6.10) очікуваний час сну $E[T_{снy}]$ телефону протягом одного мережного циклу становить:

$$E[T_{снy}] = E[N_{Scan}(\delta_{scan})] * \delta_{scan} \quad (4.11)$$

Очікуваний час використання Bluetooth можна обчислити наступним чином, враховуючи властивість експоненціального розподілу без пам'яті.

$$E[T_{BT}] = \frac{1}{\lambda} \quad (4.12)$$

Загальна вартість сканування Bluetooth за один мережевий цикл змінюється відповідно до інтервалу сканування Bluetooth і може бути виражена як у (6.13).

$$TC_{Scan}(\delta_{scan}) = e_{scan} * E[N_{Scan}(\delta_{scan})] \quad (4.13)$$

Оптимальний інтервал δ_{scan}^* - це інтервал, який компенсує споживання енергії телефону та затримку. Пропонується, що $\delta_{scan}^* = arg_{\delta_{scan}} min TC_{Scan}(\delta_{scan}) + \delta_{scan}$.

4.3.7 Алгоритм EENIS

Далі представлений алгоритми EENIS, реалізований в сенсорі (Алгоритм 2) та в мобільному телефоні (Алгоритм 3). Позначення, що

використовуються в алгоритмах наведені в таблиці 4.2. На початку датчик спілкується з мобільним телефоном користувача і перевіряє кожні δ_{NIS} секунди, якщо точка доступу ZigBee доступна (1.2). Коли він виявить, що точка доступу ZigBee доступна (1.3), можна виміряти час, проведений в Bluetooth під час цього мережевого циклу $T_{BT}[t]$ (1.6), і може оцінити очікуваний час використання Bluetooth в наступний мережевий цикл $E[T_{BT}[t + 1]]$, використовуючи $T_{BT}[t]$ та $E[T_{BT}[t]]$ (1.7-8). α - параметр між 0 і 1, який відображається, якщо ми надаємо більшого значення останнім вимірам (α приблизно 1) або якщо ми надаємо більшого значення загальній історії навколишнього середовища (α приблизно 0). Тоді датчик може наблизити очікувану швидкість переходу ZigBee з недоступної до доступної $E[\lambda]$, використовуючи $E[T_{BT}[t + 1]]$ (1.9).

Потім, коли ZigBee більше не доступний, датчик переходить на зв'язок Bluetooth. Він здатний вимірювати час, проведений у стані ZigBee $T_{zig}[t]$, і обсяг даних, переданих протягом цього мережевого циклу $AR[t]$ (1.14). Датчик може оцінити очікуваний час використання ZigBee в наступному мережевому циклі $E[T_{zig}[t + 1]]$, використовуючи $T_{zig}[t]$ і $E[T_{zig}[t]]$. Він також наближає очікуваний обсяг даних, які будуть передані в наступному мережевому циклі $E[AR[t + 1]]$, використовуючи $AR[t]$ та $E[AR[t]]$. Очікуваний коефіцієнт переходу ZigBee з доступного до недоступного можна наблизити за допомогою $E[T_{zig}[t + 1]]$. Нарешті, δ_{NIS_NEW} обчислюється за допомогою $E[\mu]$, $E[\lambda]$ та $E[AR[t + 1]]$ і призначається δ_{NIS} для наступного мережевого циклу.

Таблиця 4.2 Позначення та описи, що використовуються в алгоритмах.

Позначення	Описання
$E[\lambda]$	Очікуваний швидкий перехід стану ZigBee з недоступного до наявного стану.
$E[\mu]$	Очікувана швидкість переходу стану ZigBee з наявного стану в недоступний стан.

$E[T_{BT}[t]]$	Очікуваний час використання Bluetooth сенсором та телефоном у t мережевому циклі.
$E[T_{Zig}[t]]$	Очікуваний час використання датчика ZigBee в t -му мережевому циклі.
$E[T_{снy}[t]]$	Очікуваний час сну мобільного телефону в t -му мережевому циклі.
$T_{BT}[t]$	Час використання датчика та мобільного телефону через Bluetooth у третьому мережевому циклі.
$T_{Zig}[t]$	Час використання датчика ZigBee в третьому мережевому циклі.
$T_{снy}[t]$	Час сну мобільного телефону в t -му мережевому циклі.
$E[AR[t]]$	Очікувана середня кількість даних, що передаються датчиком (B/s) в t -му мережевому циклі.
$AR[t]$	Середня кількість даних, що передаються датчиком (байтів/с) в t -му мережевому циклі.
TC_{Sensor}	Загальне споживання енергії датчика.
TC_{Scan}	Загальне споживання енергії мобільного телефону для операцій сканування Bluetooth.
δ_{NIS}	Інтервал вибору мережевого інтерфейсу (сек).
δ_{Scan}	Інтервал сканування Bluetooth (секунди).
δ_{NIS_NEW}	Новий інтерфейс вибору мережевого інтерфейсу на датчику.
δ_{Scan_NEW}	Новий інтервал сканування Bluetooth на телефоні.
α	Коефіцієнт значення ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Коли датчик спілкується з точкою доступу ZigBee, мобільний телефон здійснює пошук пристрою кожні δ_{Scan} секунди. Коли він виявляє датчик, він починає приймати дані від датчика. У той час телефон здатний вимірювати час витрачений у режимі сну $T_{снy}[t]$, і це приблизний час очікуваний, проведений

у режимі сну на наступному мережевому циклі $E[T_{\text{снy}}[t + 1]]$, використовуючи $T_{\text{снy}}[t]$ та $E[T_{\text{снy}}[t]]$. Потім, коли мобільний телефон не отримує більше даних, він переходить у режим сну, і він може виміряти час, проведений в Bluetooth під час цього мережевого циклу $T_{BT}[t]$. Телефон також може оцінити очікуваний час використання Bluetooth у наступній мережі цикл $E[T_{BT}[t + 1]]$, і очікувана швидкість переходу ZigBee з недоступної до доступної $E[\lambda]$. Врешті-решт телефон обчислює новий $\delta_{\text{Scan_NEW}}$, використовуючи $E[\mu]$ та $E[\lambda]$, і присвоює це нове значення δ_{Scan} для наступного мережевого циклу.

Коли архітектура включає декілька датчиків тіла, кожен датчик працює алгоритмом EENIS незалежно. Якщо сенсори мають різну швидкість генерації даних, вони обчислюють різні параметри δ_{NIS} . Таким чином, датчики будуть визначати точку доступу ZigBee в різний час. Телефон залишатиметься в режимі Bluetooth, поки щонайменше один датчик не підключений, тобто поки щонайменше один датчик ще не виявив точку доступу ZigBee. Для цього мобільний телефон повинен знати лише кількість датчиків, які беруть участь у додатках. Потім він управляє змінною, яка підраховує кількість виявлених в даний час датчиків. Крім того, нам потрібно розглянути схему каналів з множинним доступом (TDMA) з множинним доступом часу, щоб запобігти суперечці, якщо всі датчики хочуть спілкуватися.

Алгоритм 1 Датчик

- 1: функція Вибір мережевого інтерфейсу
- 2: **перевірка** стану ZigBee кожні δ_{NIS} секунди
- 3: **якщо** (ZigBee доступний) **виклик** ВТдоZigBee
- 4: **кінець** функції

- 5: функція ВТдоZigBee
- 6: **Виміряти** $T_{BT}[t]$
- 7: **Обновити** $E[T_{BT}[t + 1]]$:
- 8: $E[T_{BT}[t + 1]] = \alpha * T_{BT}[t] + (1 - \alpha) * E[T_{BT}[t]]$
- 9: **Обновити** $E[\lambda]$: $E[\lambda] = 1/E[T_{BT}[t + 1]]$
- 10: **Відіслати** дані до точки доступу ZigBee
- 11: **Якщо** (ZigBee недоступний) **виклик** ВТдоZigBee
- 12: **кінець** функції

- 13: функція ZigBeeдоВТ
- 14: **Виміряти** $T_{Zig}[t]$ і $AR[t]$
- 15: **Обновити** $E[T_{Zig}[t + 1]]$:
- 16: $E[T_{Zig}[t + 1]] := \alpha * T_{Zig}[t] + (1 - \alpha) * E[T_{Zig}[t]]$
- 17: **Обновити** $E[AR[t+1]]$:
- 18: $E[AR[t + 1]] = \alpha * AR[t] + (1 - \alpha) * E[AR[t]]$
- 19: **Обновити** $E[\mu]$: $E[\mu] = 1/E[T_{Zig}[t + 1]]$
- 20: **Обновити** $\delta_{NIS_NEW} = \arg_{\delta_{NIS}} \min TC_{sensor}$ викор $E[\mu]$, $E[\lambda]$ і $E[AR[t + 1]]$.
- 21: **Відіслати** дані до смартфона
- 22: **кінець** функції

Алгоритм 2 Телефон

23: **функція** сканування Bluetooth

24: **Виконання** сканування Bluetooth кожні δ_{Scan} секунд

25: **Якщо** (датчик доступний) **Виклик** Стан сну до BT

26: **кінець функції**

27: **функція** Сон до BT

28: **Виміряти** $T_{снy}[t]$

29: **Обновити** $E[T_{снy}[t + 1]]$:

30: $E[T_{снy}[t + 1]] := \alpha * T_{снy}[t] + (1 - \alpha) * E[T_{снy}[t]]$

31: **Обновити** $E[\mu]$: $E[\mu] = 1/E[T_{снy}[t + 1]]$

32: **Отримати** дані з датчика

33: **Якщо** (немає зв'язку) **Виклик** BT до Стану сну

34: **кінець функції**

35: **функція** BT до Стану сну

36: **Виміряти** $T_{BT}[t]$

37: **Обновити** $E[T_{BT}[t + 1]]$:

38: $E[T_{BT}[t + 1]] := \alpha * T_{BT}[t] + (1 - \alpha) * E[T_{BT}[t]]$

39: **Обновити** $E[\lambda]$: $E[\lambda] = 1/E[T_{BT}[t + 1]]$

40: **Обновити** $\delta_{Scan_NEW} = arg\delta_{Scan} minTC_{Scan} + \delta_{Scan}$, викор $E[\mu]$ і $E[\lambda]$.

41: **Перейти** у режим сну

42: **кінець функції**

4.3.8 Підхід на основі SMS

Підхід на основі SMS вносить модифікації на стороні сервера та мобільних телефонів, але кожен датчик все ще запускає адаптивний алгоритм EENIS для виявлення точок доступу ZigBee. У цьому рішенні на основі SMS віддалений сервер може виявити, коли датчик не підключений до точки доступу ZigBee. Дійсно, в цій архітектурі сервер централізує всі створені дані. Оскільки швидкість генерації даних вважається постійною, сервер може виявити, коли

він і який час він не отримував дані від датчика. З цією метою сервер контролює одним таймером на датчик і надсилає повідомлення на мобільний телефон пацієнта через службу короткого повідомлення про пробудження (SMS) щоразу, коли виявляє, що датчик відключений від точки доступу. Отримавши текстове повідомлення, мобільний телефон може увімкнути свій інтерфейс Bluetooth, якщо знаходиться у сплячому режимі, та розпочати зв'язок із датчиком, без втручання пацієнта.

Таким чином, це рішення використовує традиційні стільникові текстові повідомлення як допоміжний канал для полегшення енергозбереження, як показано на рисунку 4.4.

Ця стратегія має ряд переваг щодо затримок, та економії енергії на мобільному телефоні. Дійсно, за допомогою цього рішення телефон здійснює виявлення сенсора лише один раз за мережевий цикл, за датчиком, тобто лише тоді, коли датчик відключений від точки доступу ZigBee. Більше того, ця політика не вимагає підключення телефону до мережі передачі даних (3G, WiFi) для отримання повідомлень із сервера, перебуваючи у сплячому режимі. Крім того, послуга коротких повідомлень (SMS) за своєю суттю енергоефективна, оскільки радіо не переходить у стан високої потужності при отриманні SMS [24]. Нарешті, що стосується затримки, датчик буде чекати щонайбільше δ SMS секунд, щоб виявити телефон, де δ SMS - час, необхідний серверу для виявлення відключення датчика та надсилання SMS на телефон. Професор Дондик [24] виміряв, що для отримання повідомлення в мобільний телефон в середньому потрібно 9,8 секунди. У посиланні [25] встановлено, що 73,2% повідомлень доставляються протягом десяти секунд затримки. Це рішення особливо підходить для користувачів, які мають необмежений або дешевий обмін текстовими повідомленнями. Ми також могли уявити, що витрати на тестові повідомлення включаються у постачальника програм охорони здоров'я.

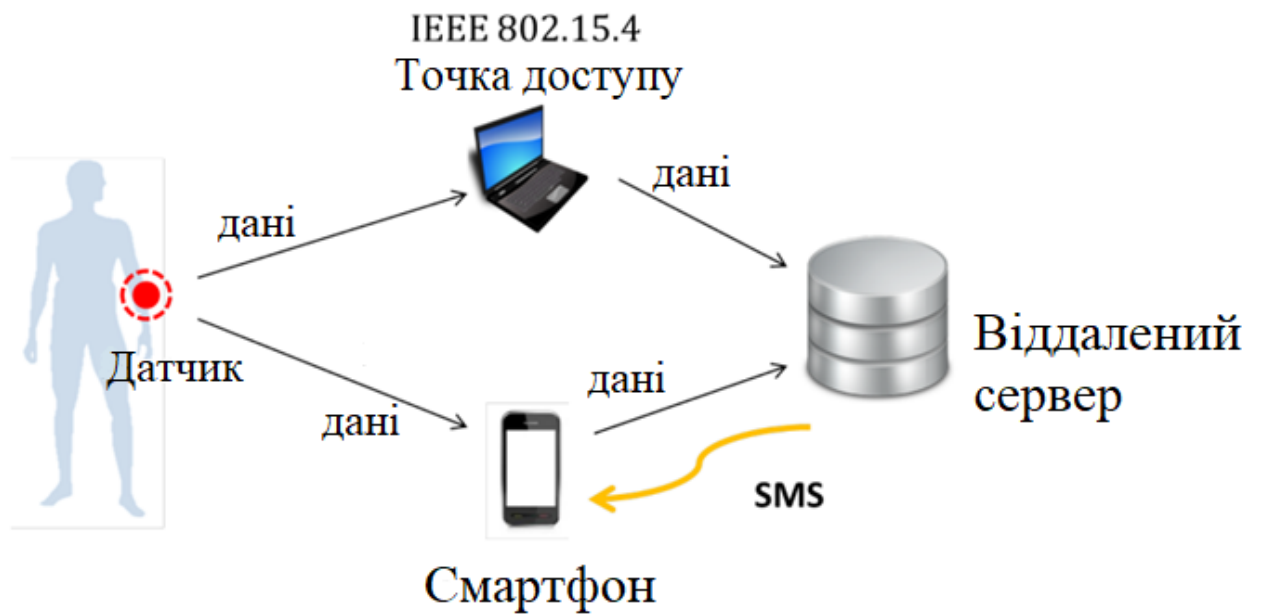


Рис. 4.4 Підхід на основі SMS

Алгоритм 3 Сервер

- 1: **функція** Отримання даних з датчика (*i*)
- 2: **Повторна ініціалізація** таймера для датчика (*i*)
- 3: **кінець функції**

4: **функція**

- 5: **Відправити** SMS на смартфон

6: **кінець функції**

4.4 Моделювання та аналіз затримки

Алгоритм 4 Смартфон

- 1: **функція** Отримання SMS від датчика (*i*)
- 2: **Виконання** Bluetooth сканування
- 3: **Якщо** (датчик *i* виявлено) **Виконати** nbConnected++
- 4: **Інакше, якщо** (nbConnected= =0) **Виконати** у режим сну
- 5: **кінець функції**

6: **функція** Відсутність даних від *i*

- 7: **Виконати** nbConnected- -
- 8: **Якщо** (nbConnected= = 0) **Перейти** у режим сну
- 9: **кінець функції**

4.4.1 Моделювання затримки

У цьому розділі ми моделюємо очікувану затримку одного вузла за чотирма політиками передачі даних: тільки Bluetooth, тільки ZigBee, одночасне використання Bluetooth та ZigBee з адаптивним підходом та підходом на основі SMS. Ми використовуємо позначення, зведені в таблиці 4.3.

Використання Bluetooth

За допомогою цієї стратегії датчик може надсилати свої дані лише мобільному телефону через зв'язок Bluetooth. Очікувана затримка $E[D_{BT}]$ може бути виражена як у рівнянні (4.14), де D являє собою обсяг даних для передачі (в МБ), а $E[R_{BT}]$ позначає очікувану швидкість передачі даних Bluetooth (у МБ/с).

$$E[D_{BT}] = \frac{D}{E[R_{BT}]} \quad (4.14)$$

Використання ZigBee

Під час використання політики ZigBee, датчик повинен чекати наявної точки доступу для надсилання своїх даних. Мінімальна кількість мережевих циклів, необхідних для передачі даних, позначається NC_{Zig} і може бути виражена рівнянням (4.15)

$$NC_{Zig} = \left\lceil \frac{D}{E[T_{Zig}] * E[R_{Zig}]} \right\rceil \quad (4.15)$$

Таблиця 4.3 Позначення та описи, використані для моделювання затримки.

Позначення	Описання
$E[T_{BT}]$	Очікуваний час використання датчика та мобільного телефону Bluetooth протягом одного мережевого циклу.
$E[T_{BT}^{Eff}]$	Ефективний час, протягом якого може відбуватися передача через Bluetooth.
$T_{Zig}[t]$	Очікуваний час використання датчика ZigBee протягом одного мережевого циклу.
δ_{NIS}	Інтервал вибору мережевого інтерфейсу (секунди).

δ_{scan}	Інтервал сканування Bluetooth (секунди).
$E[D_{BT}]$	Очікувана затримка під час використання політики лише Bluetooth.
$E[D_{Zig}]$	Очікувана затримка під час використання лише політики ZigBee.
$E[D_{Zig/BT}]$	Очікувана затримка при використанні і ZigBee, і Bluetooth.
D	Кількість даних для передачі на вузлі датчика (в МБ).
$E[R_{BT}]$	Очікувана швидкість передачі даних Bluetooth (у МБ/с).
$E[R_{Zig}]$	Очікувана швидкість передачі даних ZigBee (у МБ/с).
NC_{Zig}	Мінімальна кількість мережових циклів, необхідних для передачі даних при використанні лише політики ZigBee.
$NC_{Zig/BT}$	Мінімальна кількість мережових циклів, необхідних для передачі даних при використанні і ZigBee, і Bluetooth.
$E[A_{Zig}]$	Очікувана доступність ZigBee.
p	Час, необхідний для вибору мережевого інтерфейсу (у секундах).

Очікувана затримка $E[D_{Zig}]$ наведена в рівнянні (4.16). Вона включає в себе затримку через ефективну передачу даних через ZigBee $D/E[R_{Zig}]$ - де $E[R_{Zig}]$ - очікувана швидкість передачі даних ZigBee (у МБ/с) - плюс невикористані періоди Bluetooth, коли доступ до ZigBee був недоступним. Коли передача даних починається з періоду ZigBee, невикористаний час дорівнює $(NC_{Zig}-1) \times E[T_{BT}]$, тоді як коли передача даних починається з періоду Bluetooth, він дорівнює $NC_{Zig} \times E[T_{BT}]$. Тому очікувана затримка $E[D_{Zig}]$ залежить від наявності ZigBee $E[A_{Zig}]$, яку можна оцінити як $E[A_{Zig}] = E[T_{Zig}] / (E[T_{Zig}] + E[T_{BT}])$.

$$E[D_{Zig}] = E[A_{Zig}] * \left((NC_{Zig} - 1) * E[T_{BT}] + \frac{D}{E[R_{Zig}]} \right) + (1 - E[A_{Zig}]) * \left(NC_{Zig} * E[T_{BT}] + \frac{D}{E[R_{Zig}]} \right) \quad (4.16)$$

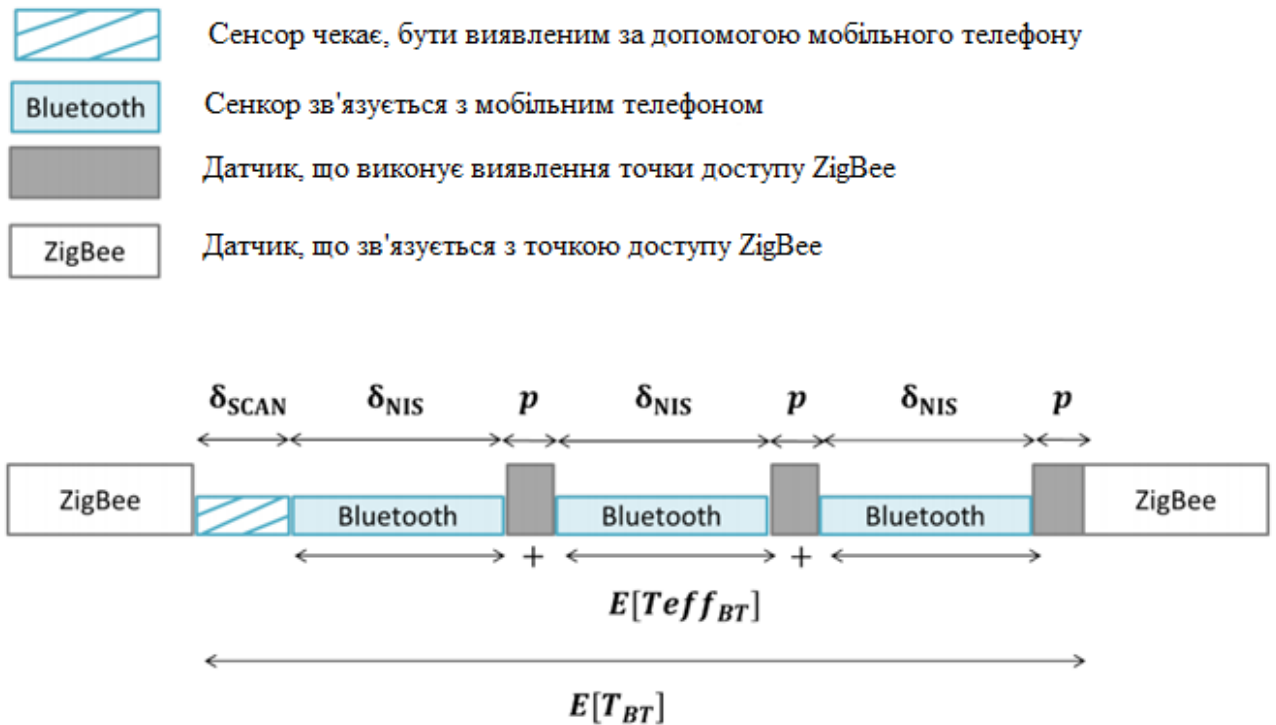


Рис. 4.5 Ілюстрація різниці між $E[T_{BT}]$ і $E[T_{BT}^{eff}]$

4.5 Використання Bluetooth та ZigBee з адаптивним підходом

У цій стратегії датчики використовують як інтерфейс Bluetooth, так і ZigBee для передачі своїх даних залежно від наявності ZigBee. Під час з'єднання Bluetooth датчики періодично здійснюють виявлення точки доступу ZigBee, що викликає коротке відключення Bluetooth. Таким чином, датчик відключається кожні δ_{NIS} секунди протягом p секунд, де p - час, необхідний для виявлення точки доступу ZigBee. Тому ми маємо розрізняти очікуваний час витрачений для Bluetooth $E[T_{BT}]$ та ефективний час, протягом якого може відбуватися передача в Bluetooth і $E[T_{BT}^{eff}]$, як показано на малюнку 4.5. Таким чином, ефективний час, протягом якого датчик може надсилати свої дані через Bluetooth, дорівнює очікуваному часу, проведеному в Bluetooth, за

вирахуванням часу, витраченого під час очікування на виявлення мобільного телефону, та витраченого часу датчиком, що виконує виявлення точки доступу ZigBee. Для простоти ми оцінюємо час, витрачений датчиком на очікування, щоб його виявляє δ_{scan} . Фактично, δ_{scan} - це максимальна кількість часу, протягом якого датчик може чекати, перш ніж його виявити. Тому у нас буде верхня межа очікуваної затримки, оскільки це консервативний підхід. $E[T_{BT}^{Eff}]$ може бути розрахований в (4.17).

$$E[T_{BT}^{Eff}] = E[T_{BT}] - \delta_{SCAN} - p - \left[\frac{E[T_{BT}] - \delta_{SCAN}}{\delta_{NIS} + p} \right] \quad (4.17)$$

Мінімальна кількість мережевих циклів, необхідних для передачі даних, позначається $NC_{Zig/BT}$ і може бути виражена (4.18).

$$NC_{Zig/BT} = \left\lceil \frac{D}{E[T_{Zig}] * E[R_{Zig}] + E[T_{BT}^{Eff}] * E[R_{BT}]} \right\rceil \quad (4.18)$$

Передача даних може розпочатися під час циклу ZigBee або Bluetooth. Тому повинна враховуватись наявність ZigBee при розрахунку затримки. Очікувана затримка при використанні ZigBee та Bluetooth разом, $E[D_{Zig/BT}]$, може бути виражена:

$$E\left[D_{\frac{Zig}{BT}}\right] = E[A_{Zig}] * \left((NC_{\frac{Zig}{BT}} - 1) * (E[T_{BT}] + E[T_{Zig}]) + \beta_1 \right) + (1 - E[A_{Zig}]) * \left((NC_{Zig/BT} - 1) * (E[T_{BT}] + E[T_{Zig}]) + \beta_2 \right) \quad (4.19)$$

У (6.19) β_1 і β_2 являють собою затримку залишкових даних (RD), які повинні бути передані протягом останнього мережевого циклу, де

$$RD = D - (NC_{\frac{Zig}{BT}} - 1) * (E[T_{BT}^{Eff}] * E[R_{BT}] + E[T_{Zig}] * E[R_{Zig}]) \quad (4.20)$$

β_1 позначає очікувану затримку останнього мережевого циклу, коли передача даних починається з періоду ZigBee. Ми повинні розрізнити два випадки: залишкові дані можна передавати протягом періоду ZigBee, а залишкові дані передавати за допомогою ZigBee та Bluetooth періоду.

$$\begin{aligned}
& \text{if } \left[\frac{RD}{E[R_{Zig} * E[T_{Zig}]]} \right] \leq 1 \text{ then } \beta_1 = \frac{RD}{E[R_{Zig}]} \quad \text{else } \beta_1 = E[T_{Zig}] + \delta_{SCAN} + \\
& \frac{RD - E[R_{Zig}]E[T_{Zig}]}{E[R_{BT}]} + \left[\frac{RD - E[R_{Zig}]E[T_{Zig}]}{E[R_{BT}]} \right] \frac{1}{\delta_{NIS}} * p \quad (4.21)
\end{aligned}$$

4.5.1 Затримка аналізу

На рисунку 5.6 показана очікувана затримка відповідно до кількості даних для передачі та різних політик передачі. Політика Bluetooth лише та, яка мінімізує затримку, оскільки ця технологія забезпечує найвищу швидкість передачі даних. Навпаки, використовуючи лише доступ до ZigBee потік даних викликає максимальну затримку. Дійсно, очікувана затримка збільшується схожими способами, оскільки ZigBee не можна використовувати постійно. Між тим, затримка, досягнута при використанні ZigBee та Bluetooth для передачі даних, залишається в цих двох крайностях і змінюється залежно від доступності ZigBee.

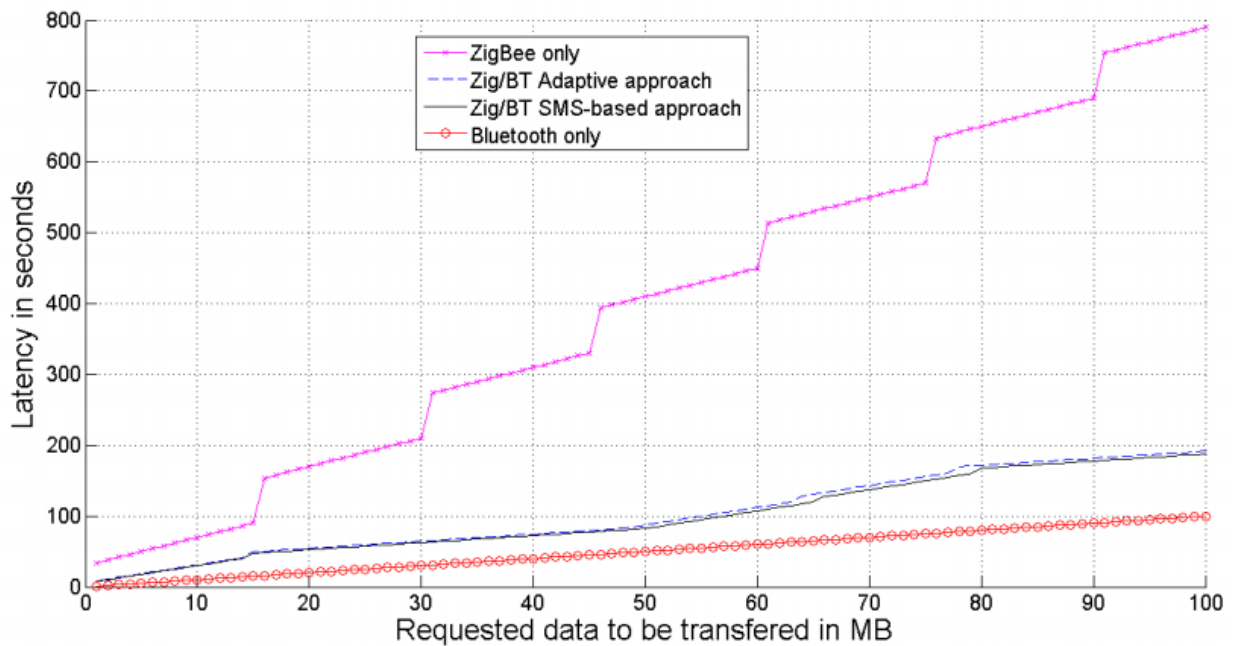
При збільшенні доступності ZigBee, змінюючи очікуваний час використання ZigBee з 60 секунд на рисунку 6.6 до 120 секунд на рисунку 5.6 б, ми можемо бачити, що затримка політики ZigBee лише зменшується, оскільки збільшуються можливості спілкування в ZigBee. Навпаки, затримка при використанні комунікацій ZigBee та Bluetooth збільшується, оскільки датчик буде проводити більше часу в ZigBee, який має нижчу швидкість передачі даних, ніж Bluetooth. Однак ця конфігурація, ймовірно, заощадить більше енергії як на мобільному телефоні, так і на датчику. Дійсно, датчик буде проводити більше часу в ZigBee, а мобільний телефон буде проводити більше часу в режимі сну. Крім того, розрив між основою SMS та адаптивного підходу розширюється, коли періоди ZigBee довші. Це тому, що оптимальний δ_{SCAN} збільшується для економії енергії, тоді як δ_{SMS} залишається постійним. Зрозуміло, що існує компроміс між енергоефективністю та затримкою, оскільки комунікаційна технологія з найбільшою швидкістю передачі даних також є тією, що має найвище споживання енергії.

4.6 Моделювання

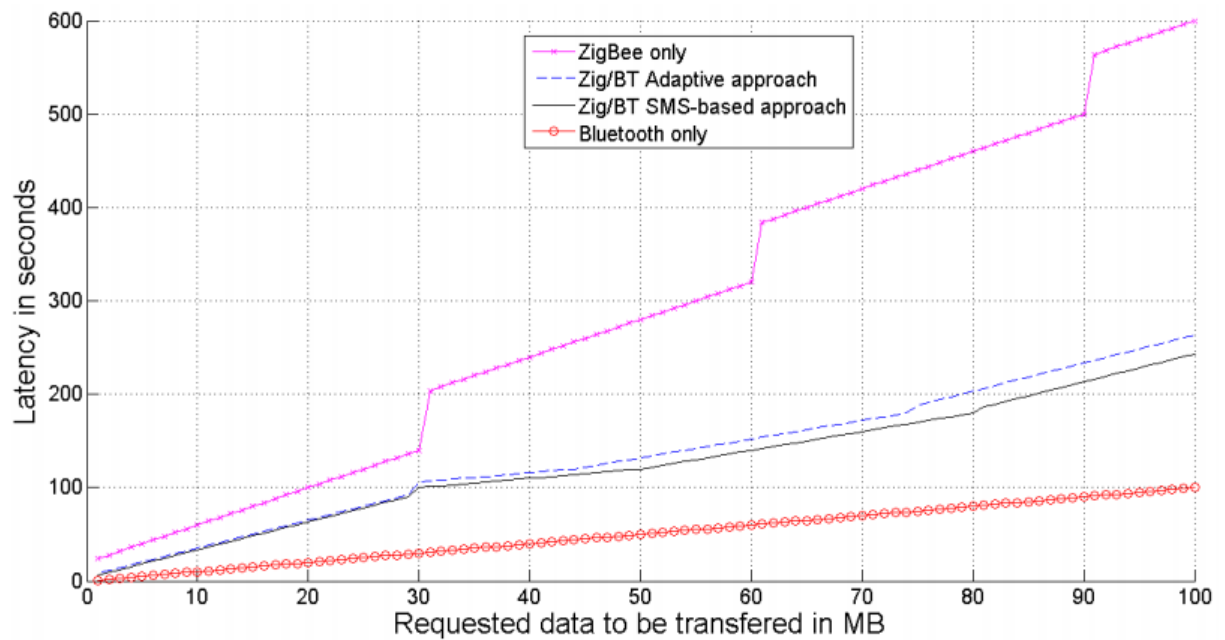
4.6.1 Налаштування моделювання

Використовується програмне забезпечення OMNeT++ для оцінки ефективності наших підходів (фіксованих, адаптивних та на основі SMS інтервалів). Ми реалізували середовище, розроблене Гельгасоном та Куюмджієвою в [26], щоб моделювати вузли, оснащені декількома керованими радіостанціями, які можна динамічно призупиняти та пробуджувати. Ми розглядаємо сценарій, що складається з:

- Мобільного датчика, оснащеного радіо Bluetooth та радіоприймачем Zigbee. Він генерує дані з постійною швидкістю.
- Мобільний телефон, оснащений мережевим інтерфейсом Bluetooth для прийому даних від датчика та з'єднання Wi-Fi для передачі даних на віддалений сервер



(a) $E[T_{BT}] = 60\text{c}$, $E[T_{Zig}] = 60\text{c}$, $E[R_{BT}] = 1\text{Mб/с}$ і $E[R_{Zig}] = 0.25\text{Mб/с}$.



(б) $E[T_{BT}] = 60\text{с}$, $E[T_{Zig}] = 120\text{с}$, $E[R_{BT}] = 1\text{Мб/с}$ і $E[R_{Zig}] = 0.25\text{Мб/с}$.

Рис. 4.6 Очікувана затримка відповідно до кількості даних для передачі

- Статична точка доступу ZigBee (наприклад, ноутбук), яка також має з'єднання Wi-Fi для зв'язку з віддаленим сервером.
- Статичний віддалений сервер, до якого можна дістатися за допомогою Wi-Fi зв'язку як мобільним телефоном, так і точкою доступу.

Датчик може надсилати свої дані або на мобільний телефон, або в точку доступу. Телефон і точка доступу можуть приймати дані від датчика, і вони автоматично передають їх через Wi-Fi до сервера, який централізує всі дані. Ми вважаємо, що користувач може перебувати у двох станах: у стані 1 користувач знаходиться поруч із точкою доступу ZigBee, тоді як у стані 2 користувач не перебуває в безпосередній близькості від точки доступу. Для моделювання переходу від одного стану до іншого використовуються наступні моделі мобільності користувачів.

- Періодичний $[r]$: У цій моделі користувач періодично змінюється з одного стану в інший кожні r секунди.
- Випадковий $[q]$: у цій моделі кожні 100 с визначається, змінить користувач своє місцезнаходження чи ні. Він переходить із стану 1 у стан 2 з ймовірністю q , а із стану 2 у стан 1 з ймовірністю $1 - q$ (тут степінь -1)

Ми розглядаємо додаток до охорони здоров'я, де датчик відбирає 6 каналів даних (наприклад, 3-осевий акселерометр та 3-вісний гіроскоп) з 16-бітовою роздільною здатністю при частоті 50 Гц. Таким чином, розмір пакета дорівнює 12 байтам для корисного навантаження плюс 6 байтів для заголовка. Параметри моделювання є узагальнені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Параметри моделювання

час моделювання	7200 с
частота вибірки	50 Гц
розмір пакету	18 В
α	0.5
e_{NIS}	0.03 J
e_{ZIG}	2.88 $\mu J/V$
e_{BT}	Датчик: 41.2 $\mu J/V$ Телефон: 3.6 $\mu J/V$
e_{SCAN}	2.27 J
$\delta_{NIS}/\delta_{SCAN}$	Фіксований: 5с адаптивний: 1-300с

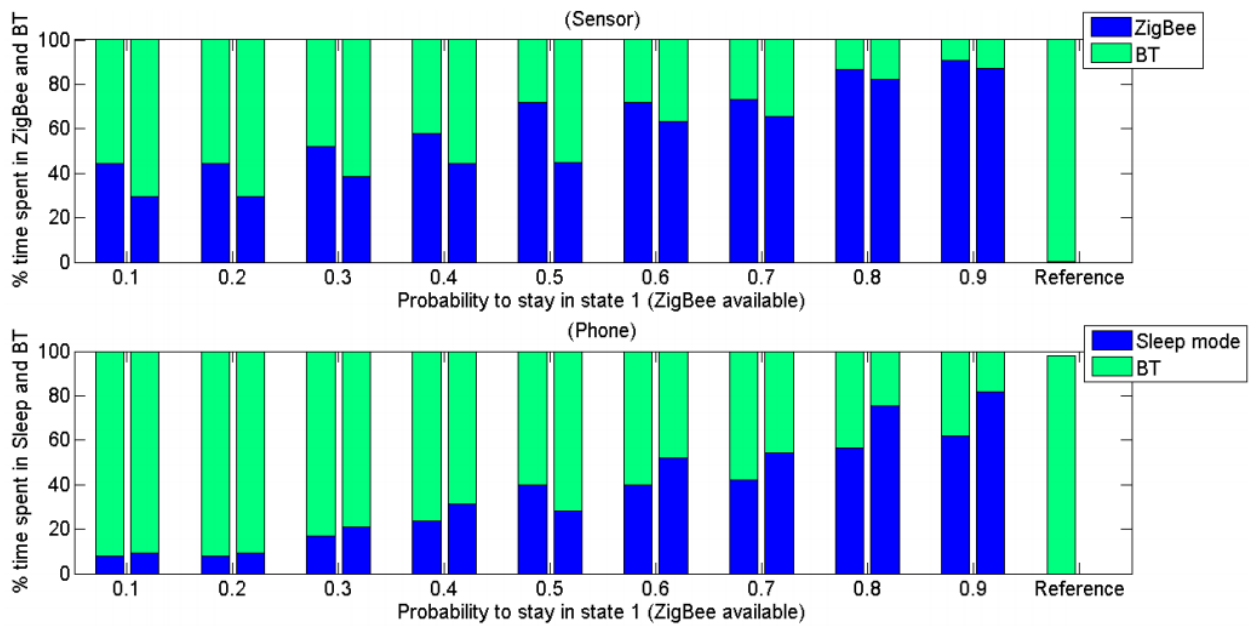
4.6.2 Результати моделювання

Фіксований та адаптивний підходи

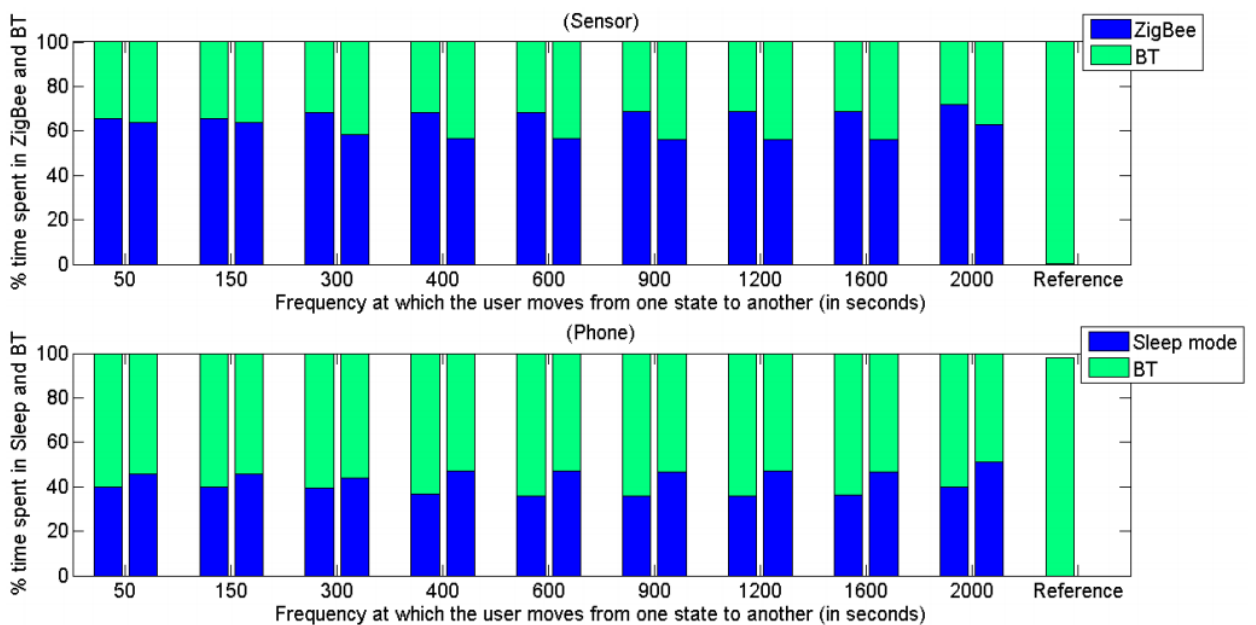
Ми вивчаємо ефективність наших підходів (фіксований та адаптаційний інтервали) у різних моделях мобільності користувачів. Ми порівнюємо наші результати з еталонною архітектурою, де сенсор може лише надсилати свої дані на мобільний телефон користувача. На рис. 4.7 представлений відсоток часу, витраченого датчиком у Bluetooth та ZigBee, для різних значень параметра p . На рис. 4.7 показано також відсоток часу, проведеного телефоном у режимі сну та Bluetooth. Щодо випадкової мобільності, то першим нашим спостереженням є те, що зі збільшенням доступності ZigBee збільшується і час, витрачений датчиком у ZigBee. Як наслідок, коли доступність ZigBee збільшується, телефон витрачає менше часу на Bluetooth і більше часу в режимі сну. Отже, фіксований та адаптивний підходи можуть скористатися наявністю точки доступу в середовищі користувача, щоб зменшити час, проведений у режимі очікування.

Якщо розглянути періодичну рухливість на рис. 4.7 б, ми можемо побачити, що датчик і телефон проводять майже 50% свого часу в Bluetooth, що відповідає тому, що ми вважаємо періодичною мобільністю де користувач змінює кожні р свій стан. Тому доступність ZigBee становить близько 50% у цьому випадку.

На рис. 4.8 ми побудуємо кількість вибору мережевого інтерфейсу, здійсненого датчиком у функції мобільності користувача, та кількість сканування Bluetooth, здійсненого телефоном.



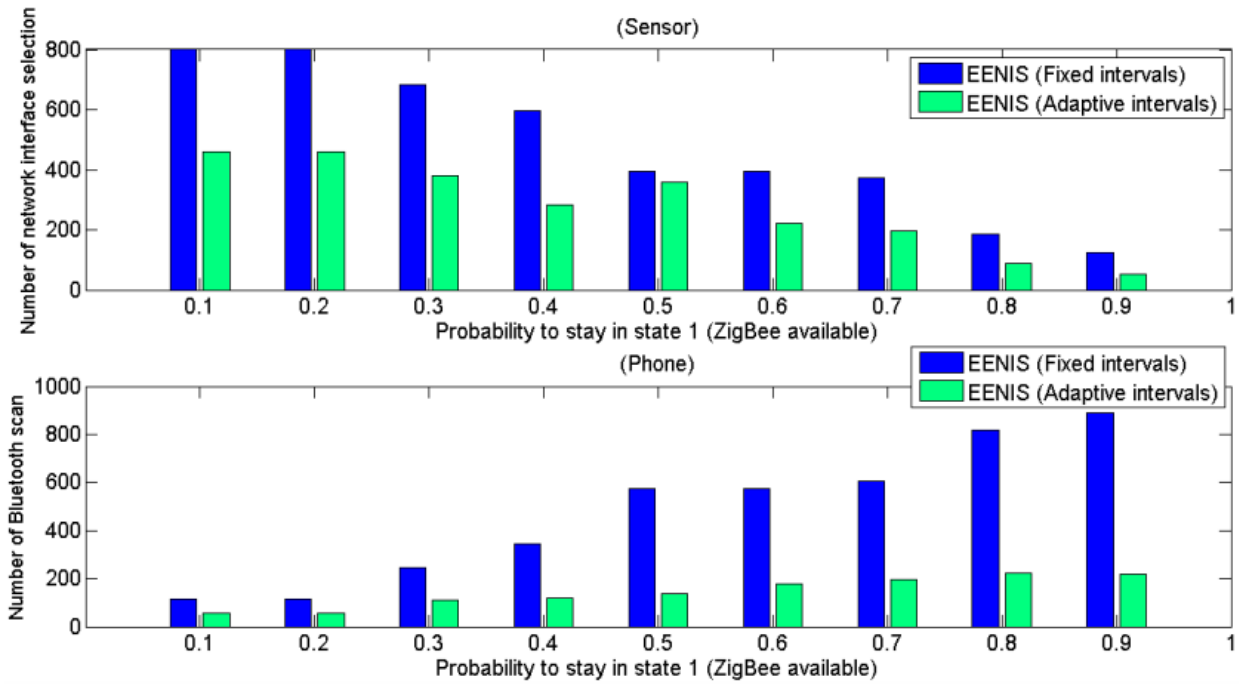
(a) Випадкова мобільність



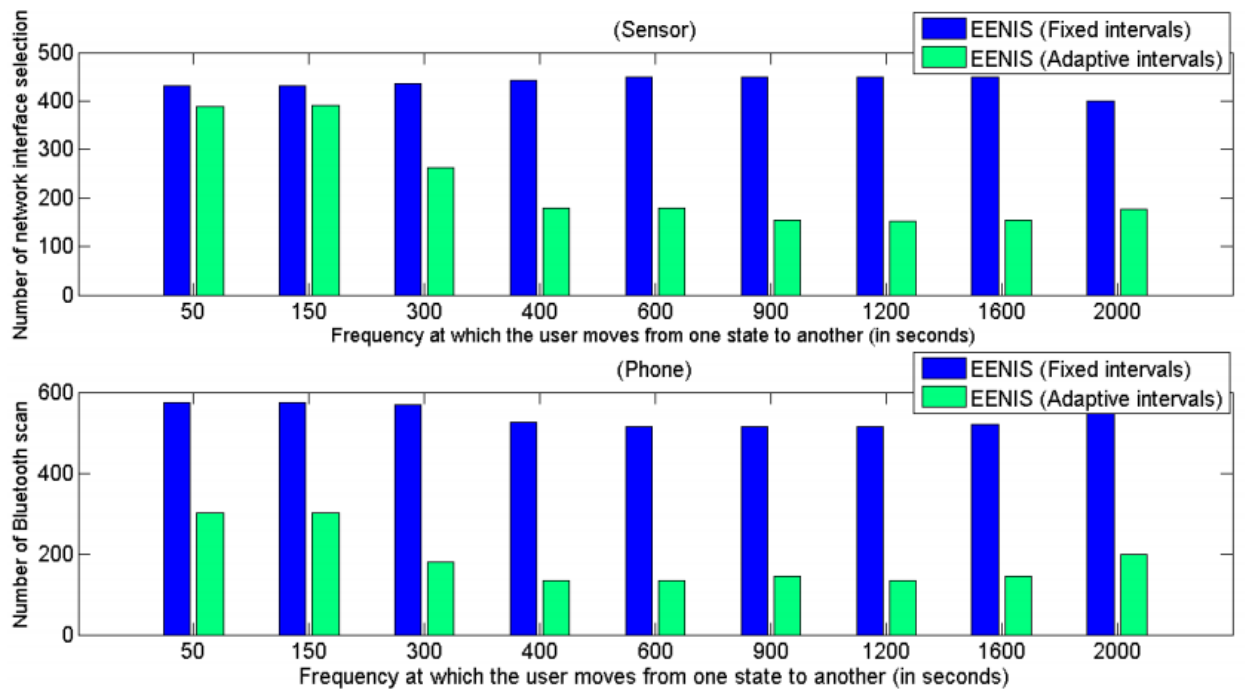
(б) Періодична мобільність

Рис. 4.7 Відсоток часу, проведеного датчиком у Bluetooth та ZigBee, а також телефоном у режимі Bluetooth та режиму сну, у залежності від мобільності користувача

На рис. 4.8 побудована кількість виборів мережевого інтерфейсу, здійсненого датчиком у функції мобільності користувача, та кількість сканування Bluetooth, здійсненого телефоном.



(a) Випадкова мобільність



(б) Періодична мобільність

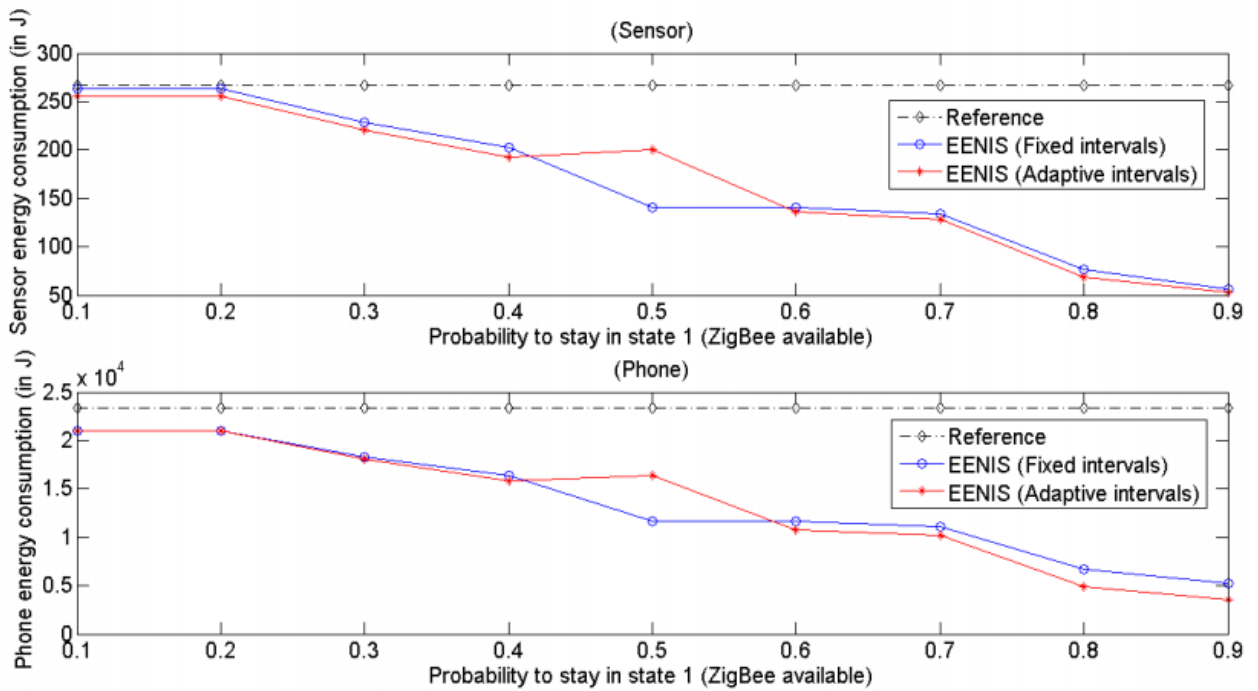
Рис. 4.8 Кількість виборів мережевого інтерфейсу на датчику та кількість сканування Bluetooth на мобільному телефоні в залежності від мобільності користувача

Перше спостереження полягає в тому, що адаптивний підхід дозволяє зменшити кількість вибору мережевого інтерфейсу на датчику та кількість сканування Bluetooth на стороні телефону. При розгляданні випадкової зміни (рис. 4.8a) у міру збільшення доступності ZigBee, то кількість тестів, проведених датчиком для виявлення точки доступу ZigBee, зменшується, оскільки датчик проводить менше часу в Bluetooth. Навпаки, кількість сканування Bluetooth збільшується, оскільки мобільний телефон більше часу проводить у сплячому режимі. Адаптивне рішення адаптує інтервали δ_{NIS} та δ_{SCAN} до мережевих умов. Отже, коли користувач прагне довше перебувати в одному стані, інтервали можуть бути збільшені, оскільки ймовірність успіху через короткий проміжок часу низька.

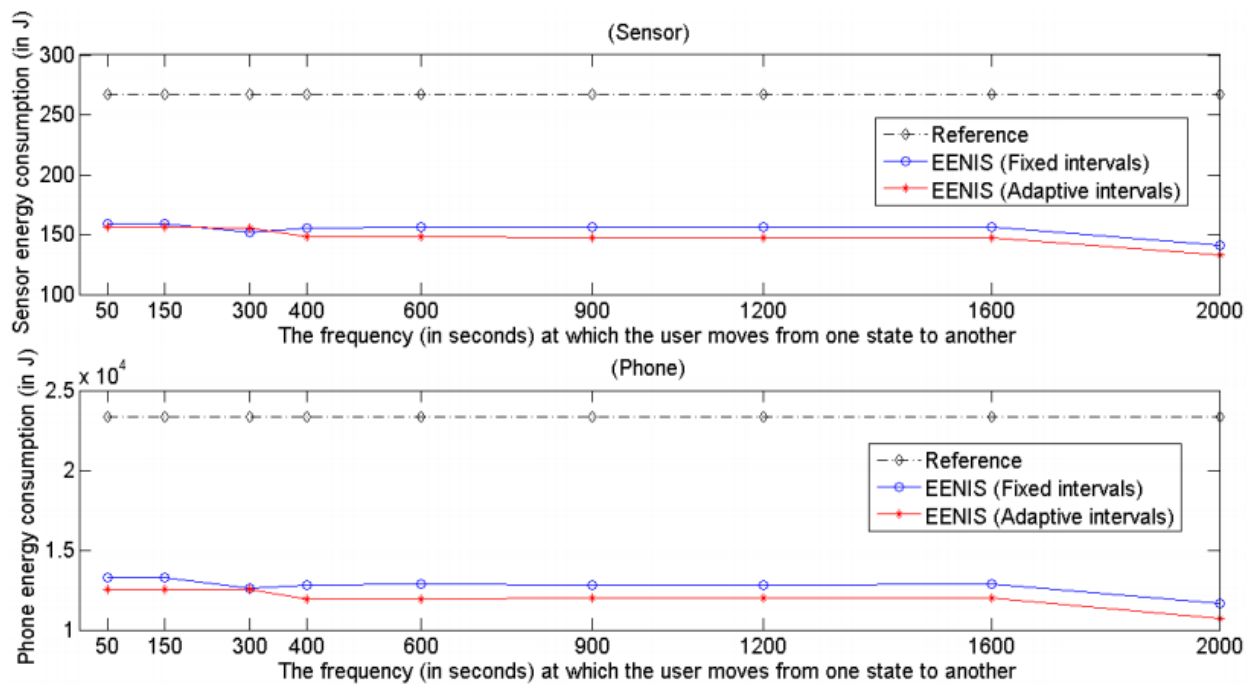
На рис. 4.9 показано споживання енергії датчика та телефону. На датчику витрата енергії складається із витрат на зв'язок ZigBee та Bluetooth, а також вартості вибору мережевого інтерфейсу. З боку телефону витрата енергії включає витрати на зв'язок Bluetooth та вартість сканування Bluetooth. Можливо включити споживання енергії через зв'язок Wi-Fi, оскільки телефон повинен ретранслювати отримані дані на віддалений сервер. Ця архітектура дозволяє зменшити споживання енергії на обох пристроях порівняно з еталонною архітектурою, де датчик може спілкуватися лише з мобільним телефоном користувача. Розрив між фіксованим та адаптивним підходами можна пояснити додатковим споживанням енергії за рахунок періодичного вибору мережевого інтерфейсу та сканування Bluetooth у фіксованому рішенні. Більше того, ми можемо спостерігати, що форми споживання енергії у датчика та телефону схожі.

Це відбувається тому, що у цих налаштуваннях споживання енергії завдяки зв'язку Bluetooth переважає порівняно з споживанням енергії комунікацій ZigBee. Для випадкової мобільності (рис. 4.9a) витрата енергії як на датчику,

так і на мобільному телефон зменшується, коли збільшується доступність ZigBee. Це відбувається тому, що мобільний телефон може більше часу проводити в режимі сну, а датчик переважно використовує радіопередавач ZigBee малої потужності. Маючи періодичну рухливість (рис. 4.9б), ми можемо спостерігати, що споживання енергії обох пристроїв відповідає енерговитратам пристрою, коли доступність ZigBee дорівнює 50%.



(a) Випадкова мобільність

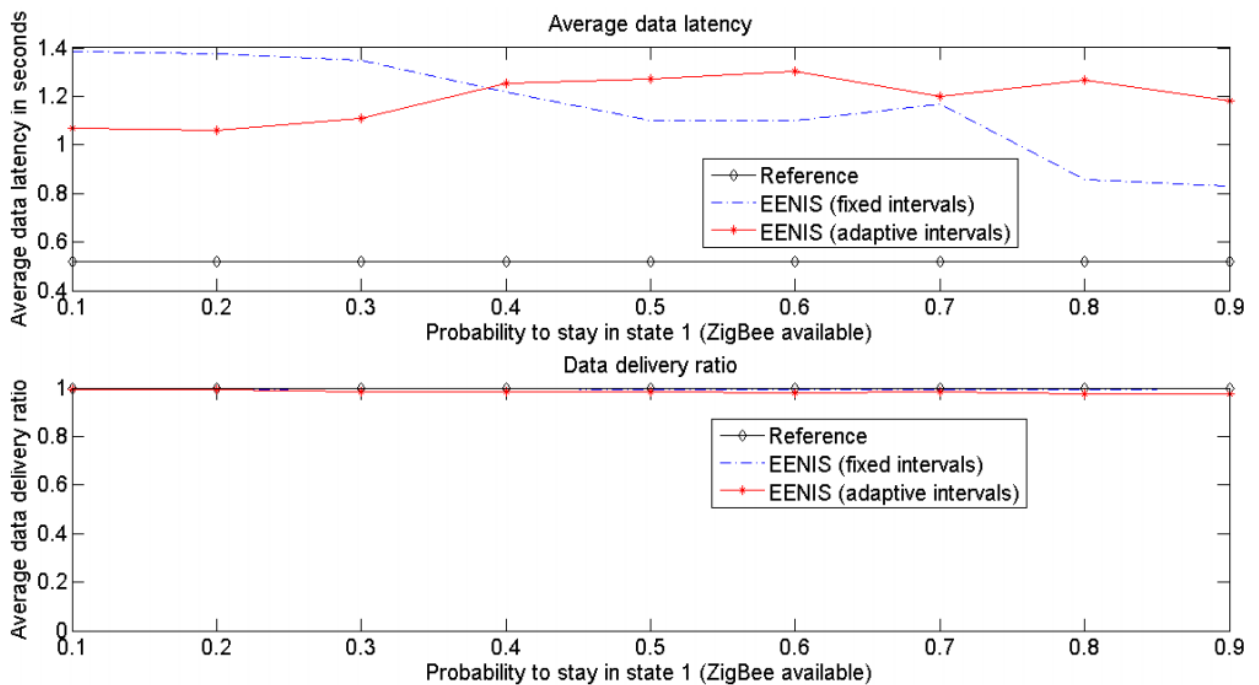


(б) Періодична мобільність

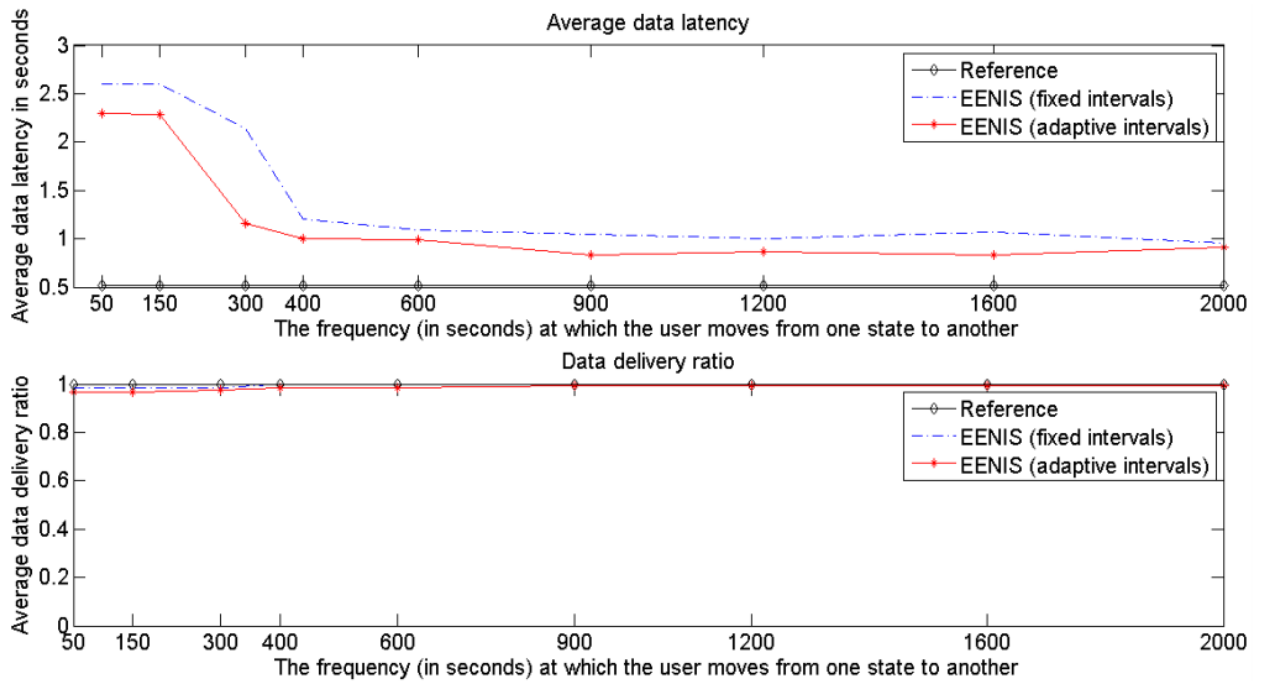
Рис. 4.9 Споживання енергії в джоулях на датчику і в телефоні, в залежності від мобільності користувача

На рис. 4.10 побудована середня затримка даних, досягнута різними рішеннями. Затримка даних відповідає часу, що минає між генерацією даних на датчику і прийомом даних віддаленим сервером. Ця архітектура вводить розумну затримку порівняно з еталонною архітектурою. Ця додаткова затримка відбувається через вибір мережевого інтерфейсу та сканування Bluetooth. Дійсно, коли сенсор виконує вибір мережевого інтерфейсу, він повинен вимкнути свій Bluetooth модуль, увімкнути ZigBee, прослухати кілька секунд і якщо є точка доступу ZigBee і якщо датчик не визначає точку доступу ZigBee, він повинен вимкнути ZigBee модуль та увімкнути Bluetooth.

Під час цієї процедури датчик генерує дані, але не може їх надсилати, що вводить додаткову затримку. Крім того, коли датчик чекає його виявлення, мобільний телефон не може надсилати свої дані, тоді як у довідковій архітектурі датчик завжди підключений до мобільного телефону і постійно надсилає свої дані.



(a) Випадкова мобільність



(б) Періодична мобільність

Рис. 4.10 Середня затримка даних та коефіцієнт передачі даних, залежно від мобільності користувача

4.7 Адаптивний підхід та підхід на основі SMS

Далі порівнюється ефективність двох підходів, враховуючи модель випадкової мобільності користувачів. На рис. 5.11 представлено відсоток часу, витраченого датчиком на Bluetooth та ZigBee, для обох рішень. Рис. 4.11 показує відсоток часу, проведеного телефоном у режимі сну та Bluetooth. Праві смуги призначені для підходу на основі SMS, а ліві - для адаптивного підходу. Ми не спостерігаємо великої різниці в поведінці пристроїв між двома рішеннями. Це можна пояснити тим, що в наших параметрах споживання енергії переважає зв'язок Bluetooth. Тому адаптивне рішення має тенденцію до обчислення коротких інтервалів δ_{SCAN} , близьких до затримки δ_{SMS} . Як наслідок, обидва рішення здатні швидко виявити можливості спілкуватися з точкою доступу ZigBee, в результаті чого однакового відсоток часу, проведеного в різних режимах.

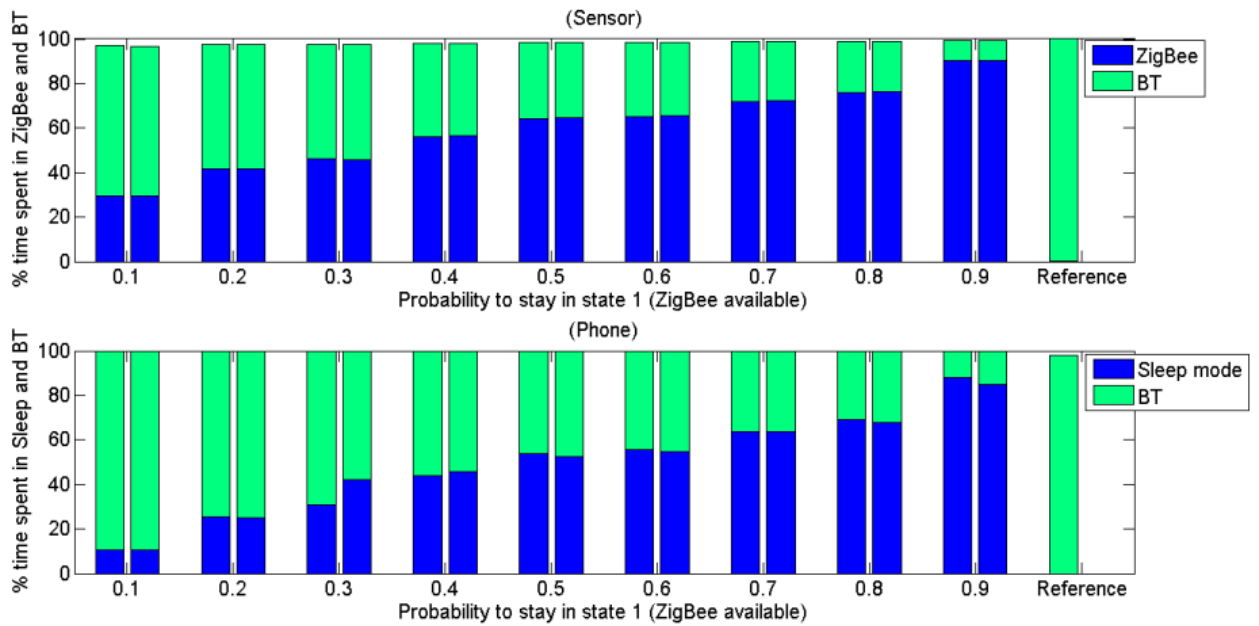


Рис. 4.11 Відсоток часу, витрачений датчиком у Bluetooth та ZigBee, а також телефоном у режимі Bluetooth та режиму сну

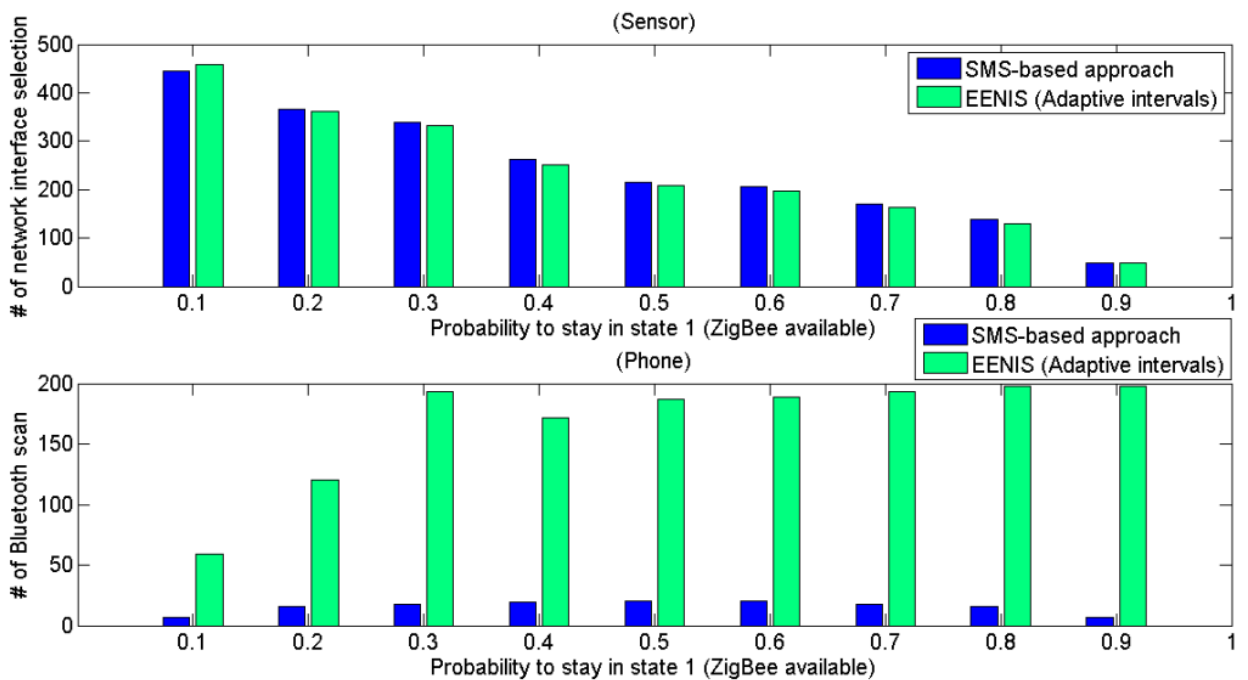


Рис. 4.12 Кількість виборів мережевого інтерфейсу на датчику та кількість сканування Bluetooth на мобільному телефоні

На рис. 4.12 побудована кількість виборів мережевого інтерфейсу, виконаних датчиком, та кількість сканування Bluetooth, здійснених телефоном. Як і очікувалося, на основі SMS підхід дозволяє зменшити кількість сканувань Bluetooth, що виконуються мобільним телефоном. Це відбувається тому, що телефон отримує текстове повідомлення від сервера

лише за потреби. Можна помітити, що для підходу на основі SMS кількість сканування Bluetooth не збільшується при наявності ZigBee (порівняно з адаптивним підходом). Насправді ця кількість збільшується із кількістю мережевих циклів, оскільки мобільний телефон виконує одне Bluetooth сканування за мережевим циклом. На рис. 4.13 показано споживання енергії датчика та телефону. Очікувалось більше зменшення споживання енергії на телефоні за допомогою програми на базі SMS, оскільки телефон виконує значно менше сканувань Bluetooth за допомогою цього рішення. Однак порядок величини споживання енергії внаслідок зв'язку Bluetooth компенсує приріст енергії за рахунок зменшення кількості сканувань Bluetooth на телефоні. На рис. 4.14 видно, що середня затримка даних, досягнута рішенням на основі SMS, є дещо кращою, ніж та яка досягнена адаптивним підходом. Це пояснюється тим, що підхід на основі SMS зменшує час, який датчик витрачає у режимі відкриття, очікуючи на те, щоб його виявив мобільний телефон.

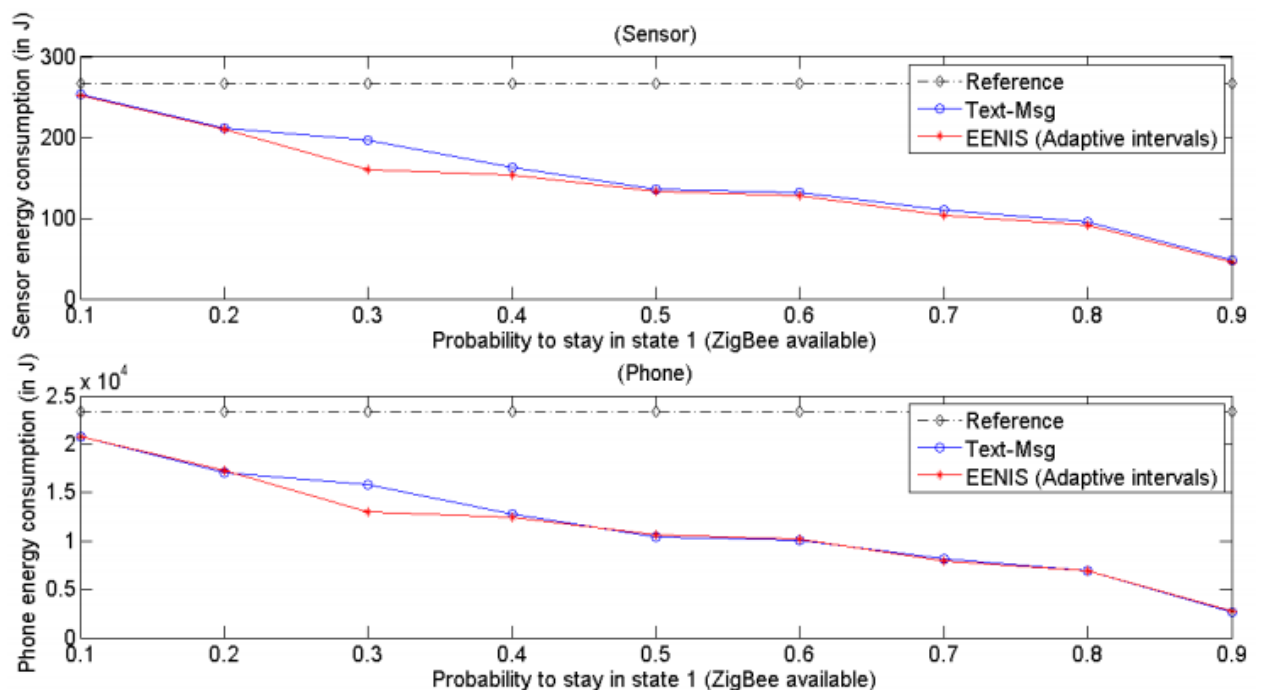


Рис. 4.13 Споживання енергії в джоулях на датчику та на телефоні

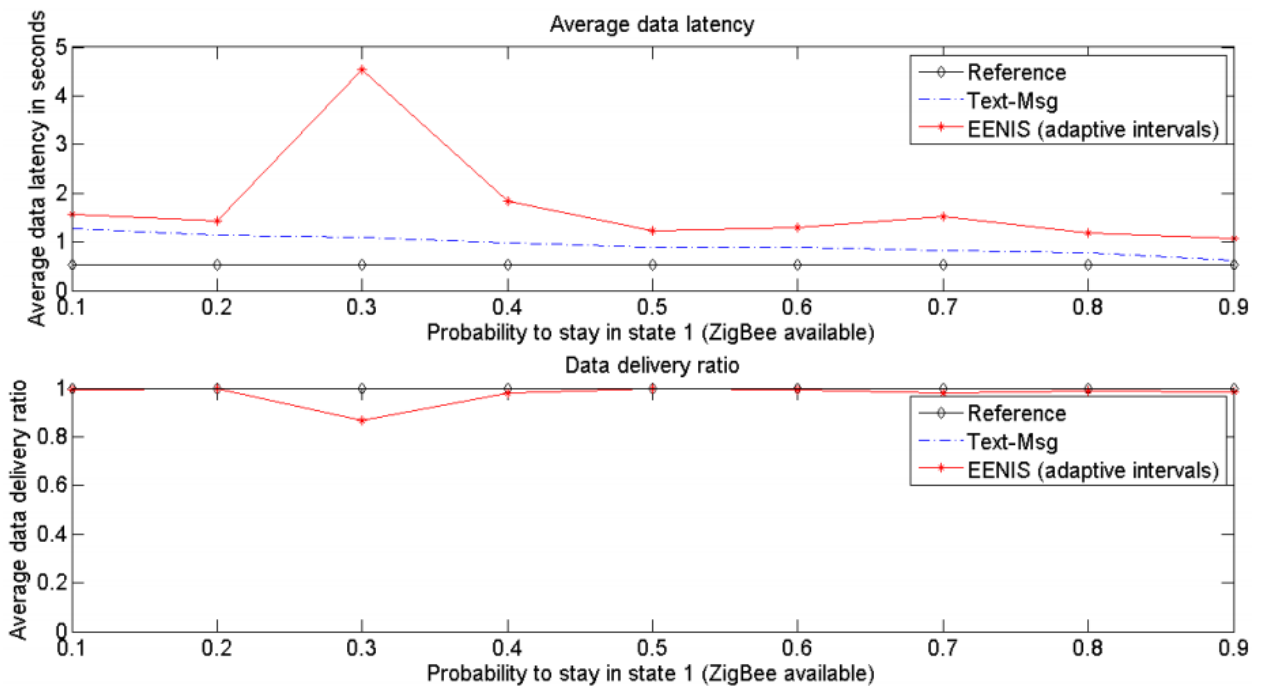


Рис. 4.14 Середня затримка даних та коефіцієнт передачі даних

На рис. 4.14 показано, що всі рішення досягають високого коефіцієнта доставки даних на віддаленому сервері та ці рішення компромісують енергоефективність для затримки.

Ми використовуємо випадкову рухливість з параметром $q = 0,5$. На рис. 4.15 побудовано середній відсоток часу, витраченого датчиками в режимі ZigBee та Bluetooth. Рис. 4.15 відповідає відсотку часу, проведеного телефоном у режимі сну та Bluetooth. Оскільки відсоток часу, витрачений пристроями в тому чи іншому режимі, залежить від доступності ZigBee, ми спостерігаємо, що це співвідношення не змінюється з кількістю вузлів.

Рис. 4.16 ілюструє середню кількість виборів мережевих інтерфейсів, виконаних датчиком, та кількість сканувань, виконаних телефоном, у залежності від кількості датчиків в мережі. Ми можемо бачити, що середня кількість виявлень точки доступу, проведена датчиком, є постійною. Це відбувається тому, що на δ NIS впливає доступність ZigBee, але не кількість датчиків. Навпаки, кількість виконаних сканувань Bluetooth за мобільним телефоном лінійно збільшується з кількістю вузлів. Це відбувається тому, що в рішенні на основі SMS телефон отримує текстове повідомлення для кожного датчика та виконує індивідуальне виявлення датчика. Однак слід зауважити,

що кількість тестів, проведених телефоном з підходом на основі SMS, коли є п'ять вузлів, становить близько 100, що становить половину кількості тестів, проведених телефоном, при адаптивному підході, а коли в мережі є лише один датчик приблизно 200 на рис. 4.12 і 4.8а.

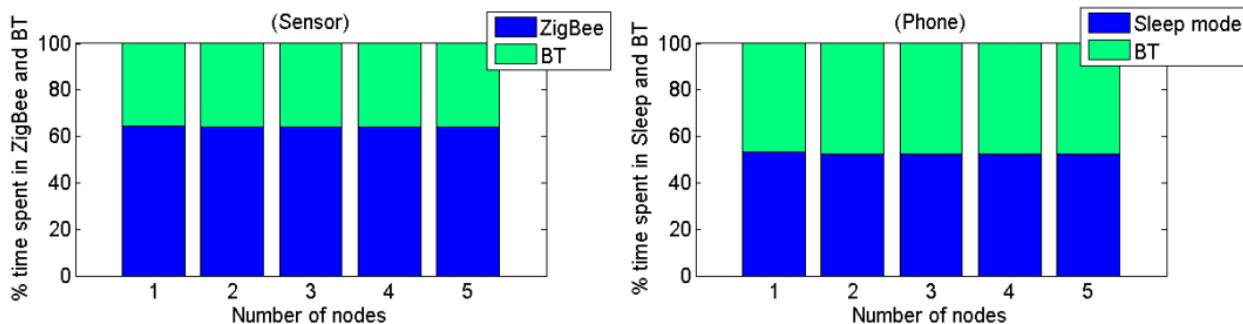


Рис. 4.15 Відсоток часу, витрачений датчиками в Bluetooth та ZigBee, а також телефоном у режимі Bluetooth та сну

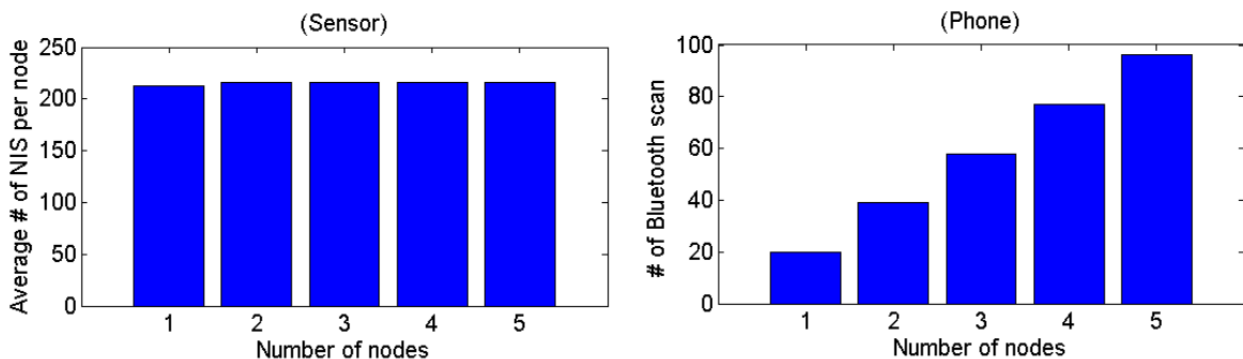


Рис. 4.16 Кількість вибору мережевого інтерфейсу на датчику та кількість сканування Bluetooth, здійсненого на мобільному телефоні, в залежності від кількості датчиків

На рис. 4.17 представлено середнє споживання енергії телефону та датчика. Індивідуальне споживання енергії датчиків не впливає кількість датчиків у мережі. Це пояснюється тим, що датчики споживають енергію під час передачі своїх даних та під час вибору мережевого інтерфейсу, а не тоді, коли передають данні іншим вузлам. Навпаки, споживання енергії мобільного телефону лінійно збільшується з кількістю датчиків, оскільки виснаження енергії в мобільному телефоні відбувається в основному за допомогою зв'язку Bluetooth. Кількість даних, отриманих телефоном, множиться на кількість датчиків.

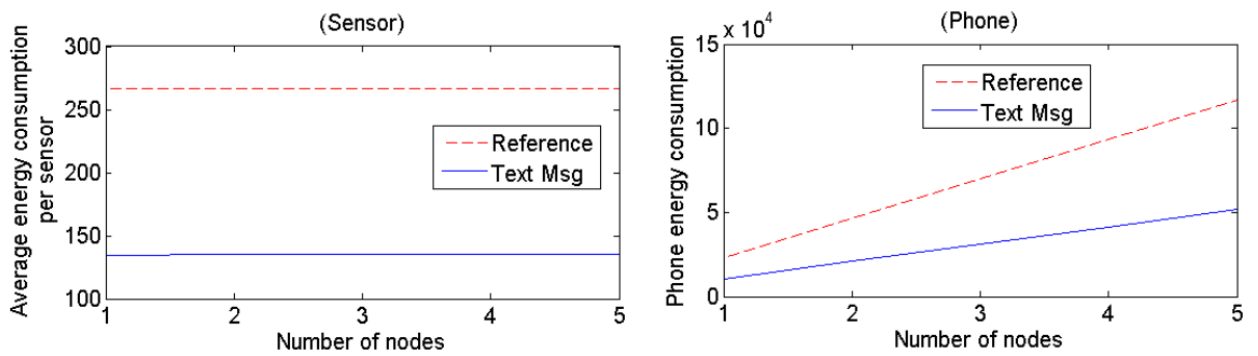


Рис. 4.17 Споживання енергії в джоулях на датчиках і в телефоні, в залежності від кількості вузлів

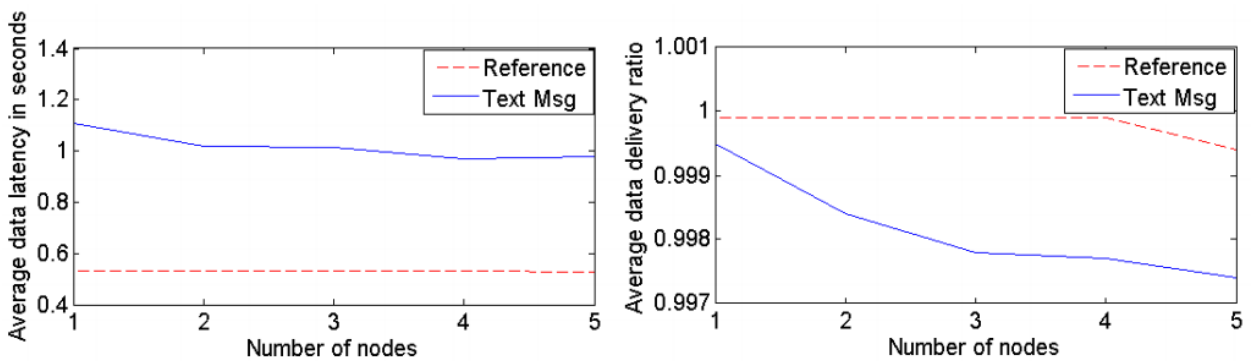


Рис. 4.18 Середня затримка даних та коефіцієнт передачі даних у функції від кількості вузлів

На фігурі. 4.18 показана середня затримка даних, досягнута обома рішеннями з різною кількістю вузлів. Рис. 4.18 відображає відношення передачі даних на сервер. Як видно, коефіцієнт передачі даних залишається вище 0,99, а затримка залишається постійною навіть тоді, коли кількість вузлів збільшується. Це можна пояснити тим, що, канал доступу розділений між більшою кількістю вузлів, швидкість генерації даних, швидкість передачі даних ZigBee та Bluetooth, а також розмір буфера достатній для того, щоб забезпечити можливість передачі кожної інформації.

4.8 Впровадження енергоефективної кластеризації в безпроводній сенсорній мережі

У цьому розділі представлена розробка та реалізація легкої переносної сенсорної мережі для віддалених застосувань по нагляду за пацієнтами. Проект був розроблений для того, щоб оцінити ефективність архітектури, представлену в даному розділі за допомогою можливого прототипу. Система складається з сенсорного вузла, який контролює переміщення кінцівок

пацієнта, а також мобільного телефону та точки доступу ZigBee, які діють як шлюзи, і відповідають за передачу даних на віддалений медичний сервер. Завдання цієї архітектури - використовувати комунікації ZigBee, оскільки вони є більш енергоефективними для датчика, і за цей проміжок часу мобільний телефон може вимкнути свій інтерфейс Bluetooth, заощаджуючи таким чином енергію. Запропонований проект є прототипом.

4.8.1 Введення

У віддалених програмах моніторингу пацієнтів використовуються датчики, що носяться на тілі, які збирають клінічно важливу інформацію, таку як частота серцевих скорочень, частота дихання або температура. Для підтримки мобільності пацієнтів традиційні архітектури передбачають, що датчики передають свої дані до мобільного телефону пацієнта, який виступає як мобільний шлюз. Однак сам мобільний телефон піддається швидкому виснаженню енергії, коли йому потрібно постійно отримувати та передавати дані про стан здоров'я. Тому запропонована в розділі 5 архітектура, яка дозволяє економити енергію як на датчиках, так і на мобільному телефоні, підтримуючи мобільність пацієнта.

Основна ідея цього рішення полягає в тому, що датчики передають отримані дані через мобільний телефон користувача використовуючи Bluetooth, але вони мають можливість надсилати дані до точок доступу ZigBee, коли вони доступні в користувальницькому середовищі. Такий підхід має дві переваги: з боку датчика це пріорітезовані комунікації ZigBee, оскільки вони є більш енергоефективними для датчика, і за цей проміжок часу мобільний телефон може вимкнути свій інтерфейс Bluetooth, заощаджуючи таким чином енергію.

4.8.2 Загальна архітектура прототипу

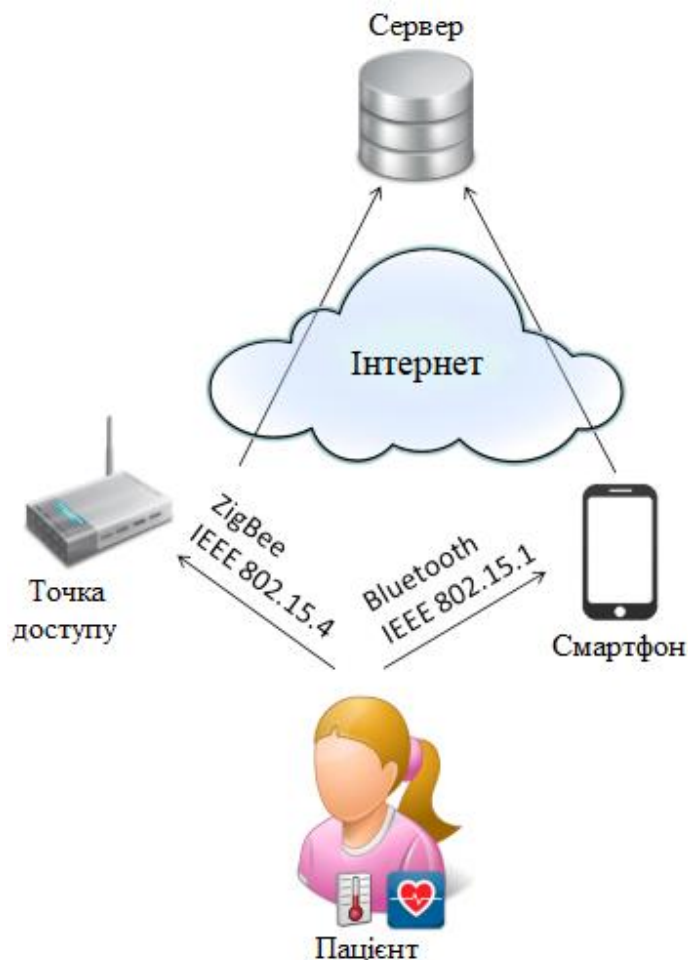


Рис. 4.19 Загальна архітектура

На малюнку 4.19 зображено прототип архітектури даної системи та її компоненти, а саме вузол датчика руху, шлюз ZigBee, мобільний телефон та віддалений сервер. У наступному розділі буде опис апаратного та програмного забезпечення компонентів архітектури.

4.8.3 Датчик вузла

Вузол датчика руху носить пацієнт і збирає дані, коли пацієнт рухає кінцівками. Використовується легка (15г) та компактна (форм-фактор 50мм25мм12,5мм) платформу Shimmer з еластичними регульованими браслетами для легкої фіксації датчика вузла. Shimmer (Sensing Health з Intelligence, Modularity, Mobility та експериментальна повторність використання) - бездротова платформа датчиків, що забезпечує можливості кінематичного зондування.

У цьому прототипі, датчик руху інтегрує тривісний акселерометр для вимірювання прискорення датчика вузла та гіроскоп для вимірювання кутової швидкості датчика вздовж трьох осей.



Рис. 4.20 Основні компоненти датчиків мережі

Основним компонентом рухомої платформи є Texas Instrument MSP 430 MCU, що працює на частоті 8 МГц. Цей мікроконтроллер малої потужності має 10 Кбайт оперативної пам'яті та інтегрований 8-канальний 12-бітний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для проекту використовується шість каналів АЦП для збору даних акселерометра та датчиків гіроскопа (1 канал на вісь). Щоб мати змогу спілкуватися бездротово, сенсорний вузол інтегрує два радіоприймачі: радіопередавач Chipcon CC2420, сумісний з IEEE 802.15.4, і модуль Bluetooth Roving Networks RN-46 класу 2. Два радіо передатчики не можуть бути використані одночасно, для чого потрібні ретельно організовані взаємовиключні процедури запуску та вимикання.

Існує додаток TinyOS, який може періодично пробуджувати датчики акселерометра та гіроскопа. Він також реалізує алгоритм вибору мережевого інтерфейсу для переключення між двома технологіями зв'язку в залежності від наявності ZigBee. Як проілюстровано на рисунку 4.20, два радіоприймачі контролюються, а модуль зв'язку і менеджер мережевого інтерфейсу керує цими двома модулями. Менеджер мережевого інтерфейсу забезпечує одночасне включення лише одного радіо приймача. Коли модуль зв'язку CC2420 увімкнено, він запускає стан прийому, під час якого приймається пакети даних. Після отримання маякового пакета менеджер інтерфейсу надсилатиме вибірккові дані через модуль зв'язку CC2420. Якщо менеджер мережевого інтерфейсу виявить, що він деякий час не отримував маякові повідомлення, він вимкне інтерфейс CC2420 і включить радіоприймач RN-46. Після включення інтерфейсу Bluetooth менеджер мережевого інтерфейсу намагається встановити з'єднання.

4.8.4 Точка доступу ZigBee

Точка доступу відповідає за отримання даних з датчика вузла і передачу їх на сервер. Точка доступу ZigBee імітується датчиком TelosB, який має той же мікроконтролер і радіопередавач, що і вузли Shimmer. Він підключається через USB-порт до ноутбука, щоб передати отримані дані. Дійсно, TelosB періодично транслює маяки, щоб рекламувати свою присутність у середовищі користувача. Після отримання даних від датчика точка доступу ZigBee передає дані на сервер.

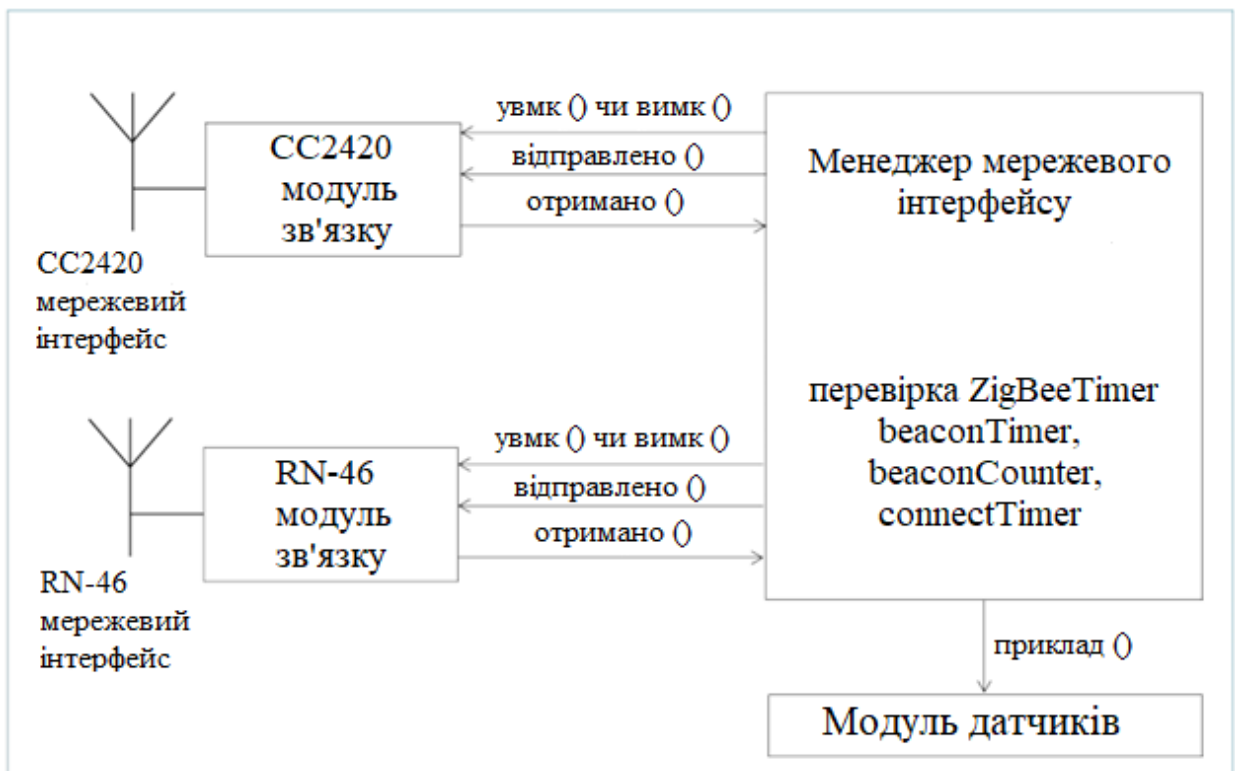


Рис. 4.21 Архітектура програмного забезпечення датчиків руху

Розроблений додаток TinyOS, який діє як реле між датчиком руху та ноутбуком, як показано на малюнку 4.22. Радіопередавач CC2420 точки доступу ZigBee контролюється модулем зв'язку, який запускає стан прийому при отриманні пакету. Отримавши цей стан, менеджер шлюзу витягує дані з пакета та передає їх в модуль послідовного зв'язку. Модуль послідовного зв'язку

надсилає цю інформацію на ПК через послідовне з'єднання USB. З боку ПК – серійний модуль слухача постійно прослухує вхідні пакети. Після отримання пакету він надсилає їх до сервера через HTTP-запити. Модуль зв'язку також періодично запускає подію відправки для надсилання маяків.

4.8.5 Мобільний телефон

Мобільний телефон - це шлюз датчика за замовчуванням: він відповідає за отримання даних датчика, коли в середовищі користувача немає доступної точки доступу. Датчик і мобільний телефон обмінюються даними за допомогою технології Bluetooth.

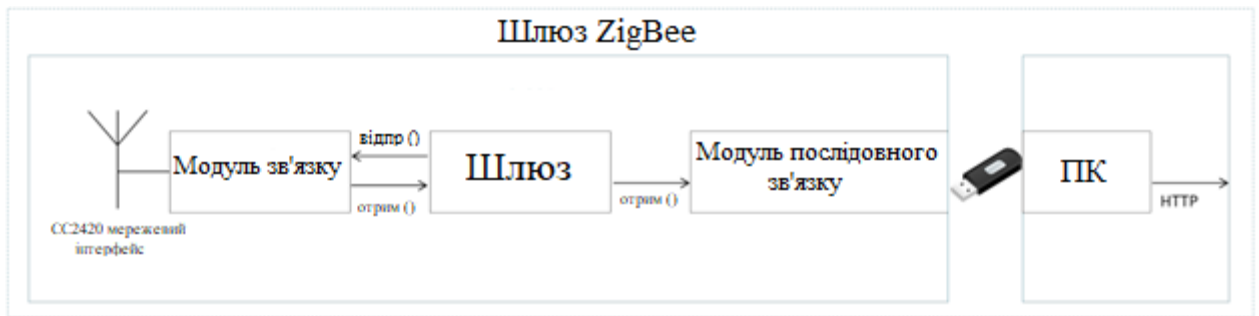


Рис. 4.22 Архітектура програмного забезпечення точки доступу ZigBee

4.8.6 Серверна частина

Сервер відповідає за централізацію даних для подальшої обробки та зберігання. Насправді сервер отримує лише дані та оновлює веб-інтерфейс, який відображає отримані дані в режимі реального часу. Можуть бути розроблені інші функціональні можливості, такі як фільтрація даних, управління профілем пацієнта та збереження даних про здоров'я. Паралельно може бути розроблена програма для лікаря для доступу до збережених даних та перевірки фізичної працездатності пацієнта. Лікар зможе здійснити пошук профілю пацієнта, візуалізувати захоплені дані, додати коментарі або написати звіт. Сервер розроблений в python і отримує дані через HTTP-запити як із шлюзу ZigBee, так і з мобільного телефону. Далі дані відображаються на веб-сторінці за допомогою мікросхеми Flask micro web application, як показано на малюнку 4.23. Для розрізнення комунікаційних інтерфейсів відображаються дані, отримані через інтерфейс Bluetooth. Знімок екрана відповідає програмі, в якій датчик перемикається між двома його радіостанціями кожні 30 секунд. З графіку видно чередування зав'язків ZigBee та Bluetooth кожні 30 секунд. Слід зазначити що, в ході експерименту час, необхідний для вимкнення енергії інтерфейсу, а потім живлення іншого інтерфейсу становить приблизно 20/30 секунд. Це додаткова затримка, яку потрібно враховувати, але ми очікується, що новіша платформа інтегрується з подвійними радіоприймачами і дозволить одночасно включати їх одночасно.

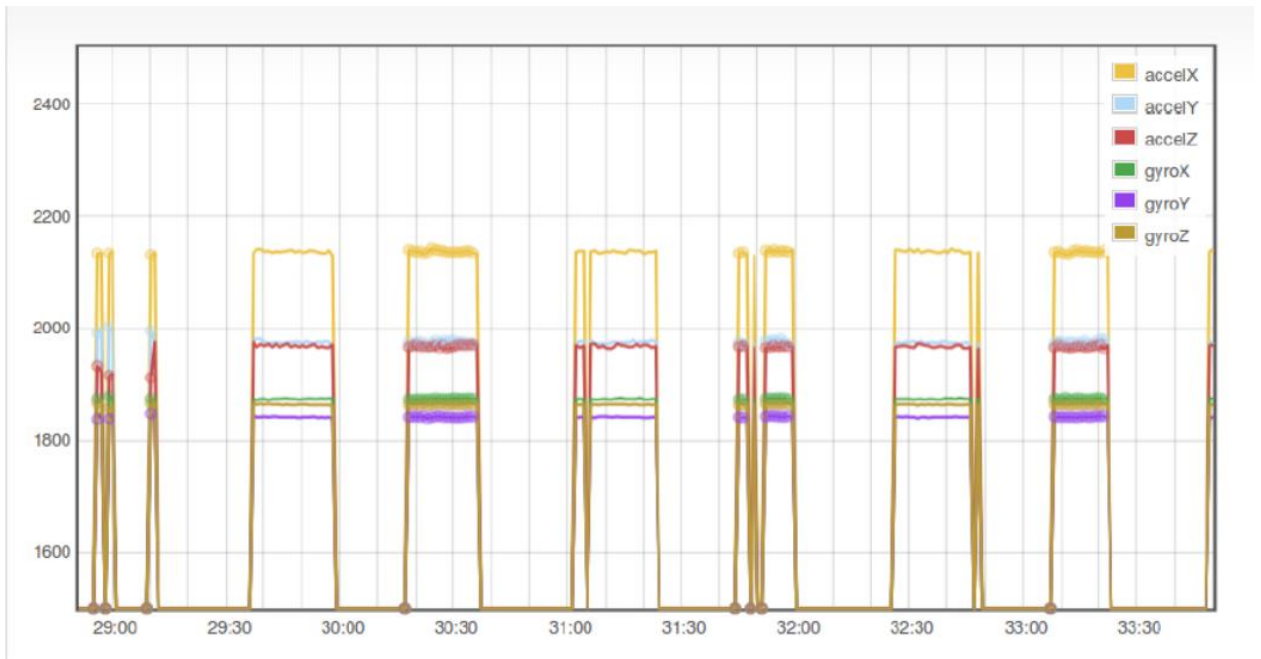


Рис. 4.23 Оновлення даних у реальному часі одержаних даних про стан здоров'я

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

У цьому розділі запропонована нова архітектура, яка покращує енергоефективність персональних мереж. На відміну від існуючих підходів, ми оптимізуємо термін служби як датчиків, так і базової станції. Дійсно, традиційні архітектури вважають, що датчики надсилають свої дані на мобільний телефон для підтримки мобільності користувача. Однак мобільний телефон також є енергетичним обмеженням, і постійне отримання даних становить додаткове навантаження. Отже, головна цього рішення - запропонувати датчикам можливість спілкуватися з точками доступу, які не завжди присутні в користувальницькому середовищі, але коли вони доступні, це дозволяє позбавити телефон від отримання всіх даних. Ці результати моделювання показують, що наш підхід збільшує термін експлуатації системи, зберігаючи при цьому хороші кінцеві затримки та коефіцієнт доставки.

Також у цьому розділі представлений проект розробки прототипу платформи безпроводної системи на основі запропонованої архітектури. Були описані різні компоненти системи та те, як вони спілкуються один з одним. Цей прототип є підтвердженням того, що енергоефективна стратегія вибору шлюзу для моніторингу пацієнтів практично здійсненна.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Удосконалення бездротових систем дозволили розвивати бездротові сенсорні мережі (WSN), що в свою чергу сприяло розвитку та появі безлічі застосувань у різних сферах, таких як сільське господарство, нагляд за лікуванням здоров'я та транспортування. Однак через обмеження датчиків енергією від акумулятора, ці системи все ще стикаються з важливою енергетичною проблемою, яка перешкоджає їх широкому застосуванню.

У цій роботі були розглянуті нові архітектури, моделі та розподілені алгоритми для підвищення енергоефективності WSN, був проведений їх аналіз та оцінювання їх ефективності.

Був проведений комплексний огляд існуючих енергоефективних механізмів, розроблених для бездротових сенсорних мереж. Це дослідження охопило різні сімейства додатків WSN та розгляд їх можливих енергоефективних рішень.

Також була запропонована енергоефективну схему збору даних з мобільною базовою станцією для контролю догляду за пацієнтами.

Ця схема показала, що підхід енергоефективної кластеризації збільшує термін експлуатації системи, зберігаючи при цьому кінцеві дані без загального навантаження на систему.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, Wireless sensor network survey, *Computer Networks* 52 (2008) 292–330 с.
2. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad Hoc Networks* 7 (2009) 537–568 с.
3. R. Rajagopalan, P. K. Varshney, Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 8 (2006) 48–63 с.
4. K. Akkaya, M. Younis, A survey on routing protocols for wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks* 3 (2005) 325–349 с.
5. S. Sudevalayam, P. Kulkarni, Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 13 (2011) 443–461 с.
6. H. A. Nguyen, A. Forster, D. Puccinelli, S. Giordano, Sensor node lifetime: An experimental study, in: *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, Seattle, WA, 2011, 202–207 с.
7. A. Prayati, C. Antonopoulos, T. Stoyanova, C. Koulamas, G. Papadopoulos, A modeling approach on the TelosB WSN platform power consumption, *Journal of Systems and Software* 83 (2010), 202–207 с.
8. I. Dietrich, F. Dressler, On the lifetime of wireless sensor networks, *ACM Transactions on Sensor Network* 5 (2009), 2–7 с.
9. C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, J. C. Chen, A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks, *Wireless Networks* 7 (2001).
10. http://eetd.lbl.gov/ee/ee_1.html, Lawrence Berkley National Laboratory “What is Energy Efficiency”, 2015, 202–207 с.
11. H. Alemdar, C. Ersoy, Wireless sensor networks for healthcare: A survey, *Computer Networks* 54 (2010) 2688–2710 с.
12. J. Ko, C. Lu, M. B. Srivastava, J. A. Stankovic, A. Terzis, M. Welsh, Wireless Sensor Networks for Healthcare, *Proceedings of the IEEE* 98 (2010) 1947–1960 с.
13. A. Hadjidj, M. Souil, A. Bouabdallah, Y. Challal, H. Owen, Wireless Sensor Networks for Rehabilitation Application: Challenges and Opportunities, *J. of Network and Computer Applications* 36 (2013) 1–15 с.

14. T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. Ko, J. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B.-r. Chen, K. Lorincz, M. Welsh, Wireless Medical Sensor Networks in Emergency Response: Implementation and Pilot Results, in: IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, Waltham, 2008,187–192 c.
15. R. Fensli, E. Gunnarson, T. Gundersen, A Wearable ECG-Recording System for Continuous Arrhythmia Monitoring in a Wireless Tele-Home-Care Situation, in: 18th IEEE Symp. on Computer-Based Medical Systems, 2005, 407–412 c.
16. J. Chen, K. Kwong, D. Chang, J. Luk, R. Bajcsy, Wearable sensors for reliable fall detection, in: 27th IEEE Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, Shanghai, 2005,3551–3554 c.
17. A. Hadjidj, A. Bouabdallah, Y. Challal, Rehabilitation supervision using wireless sensor networks, in: IEEE Int. Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Lucca, Italy, 2011, 1–3 c.
18. W.-W. Chang, T.-J. Sung, H.-W. Huang, W.-C. Hsu, C.-W. Kuo, J.-J. Chang, Y.-T. Hou, Y.-C. Lan, W.-C. Kuo, Y.-Y. Lin, Y.-J. Yang, A smart medication system using wireless sensor network technologies, *Sensors and Actuators A: Physical* 172 (2011) 315–321 c.
19. H. Ren, M. Meng, X. Chen, Wireless Assistive Sensor Networks for the Deaf, in: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006,4804–4808 c.
20. I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden, PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring, in: 6th Int. Conf. on Information processing in sensor networks (IPSN), Cambridge, MA, 2007, 264–273 c.
21. G. Owojaiye, Y. Sun, Focal design issues affecting the deployment of wireless sensor networks for pipeline monitoring, *Ad Hoc Networks* 11 (2013).
22. M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah, Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid, *Ad Hoc Networks* 9 (2011) 542–551 c.
23. W. Wang, Y. Xu, M. Khanna, A survey on the communication architectures in smart grid, *Computer Networks* 55 (2011) 3604–3629 c.

24. M. Tubaishat, P. Zhuang, Q. Qi, Y. Shang, Wireless sensor networks in intelligent transportation systems, *Wireless Communications & Mobile Computing* 9 (2009) 287–302 c.

25. C. Wenjie, C. Lifeng, C. Zhanglong, T. Shiliang, A Realtime Dynamic Traffic Control System Based on Wireless Sensor Network, in: *Int. Conf. Workshops on Parallel Processing*, Oslo, Norway, 2005, 258–264 c.

26. H. Qin, Z. Li, Y. Wang, X. Lu, W. Zhang, An Integrated Network of Roadside Sensors and Vehicles for Driving Safety : Concept , Design and Experiments, in: *IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, Mannheim, 2010, 79–87 c.