

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

**«Інформаційно-комунікаційна технологія
синхронізації елементів бездротових сенсорних
мереж»**

**Завідувач
випускаючої кафедри**

Довбиш А.С.

Керівник роботи

Великодний Д.В.

Студентка групи ІН.мз-01с

Бергазова О.С.

СУМИ 2021

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 7 |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗДРОВОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ..... | 9 |
| 1.1. Визначення головних понять дослідження: «бездротова сенсорна мережа» «датчики» «сенсори» «топология сенсорних мереж» «синхронізація» | 9 |
| 1.2. Особливості бездротових сенсорних мереж..... | 17 |
| 1.3. Радіоінтерфейси у бездротових сенсорних мережах | 21 |
| 1.4. Постановка задачі роботи | 28 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГОДИННИКА В БЕЗДРОВОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ | 29 |
| 2.1 Загальна характеристика поширення радіосигналу | 29 |
| 2.2 Моделі розповсюдження | 33 |
| 2.3. Характеристики проблеми синхронізації тактового сигналу датчика .. | 35 |
| 2.4. Синхронізація годинника RBS та його вдосконалення | 39 |
| 2.5. Порівняння продуктивності різних методів синхронізації часу | 47 |
| РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ БЕЗДРОВОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ | 52 |
| 3.1. Механізм синхронізації за допомогою розробленої програми | 52 |
| 3.2. Фаза налаштування синхронізації бездротової сенсорної мережі..... | 53 |
| 3.3. Фаза підтримки синхронізації бездротової сенсорної мережі | 56 |
| 3.4. Розроблення програми..... | 58 |
| 3.5. Оцінка функціонування..... | 59 |
| ВИСНОВКИ..... | 67 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 68 |

РЕФЕРАТ

Записка: 75 стор., 9 рис., 68 джерел.

Об'єктом дослідження є бездротові сенсорні мережі.

Предметом дослідження є розвиток інформаційно-комунікаційної технології синхронізації елементів бездротових сенсорних мереж.

Мета – розвиток технології синхронізації в бездротових сенсорних мережах шляхом покращення енергоефективності мережі та показників синхронізації часу, що ставить до виконання таких завдань:

Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові та спеціальні методи: діалектичний, синтезу, аналізу, порівняння.

Результати – визначили головні поняття дослідження: «бездротова сенсорна мережа» «датчики» «топология сенсорних мереж» «синхронізація». Проаналізували особливості бездротових сенсорних мереж. Зробили огляд радіоінтерфейсів у бездротових сенсорних мережах. Провели загальну характеристику поширення радіосигналу. Розробили програму.

БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, РАДІОІНТЕРФЕЙСИ, ДАТЧИКИ,
ТОПОЛОГІЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ, СИНХРОНІЗАЦІЯ

Сумський Державний Університет

(назва вузу)

Факультет ЦЗДВН Кафедра Комп'ютерних наукСпеціальність «122 -Комп'ютерні науки»

Затверджую:

зав.кафедрою _____

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТОВІ

Бергазовій Олександрі Сергіївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Інформаційно-комунікаційна технологія синхронізації елементів бездротових сенсорних мереж__

затверджую наказом по інституту від “ _____ ” _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вхідні данні до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1) Проаналізували особливості бездротових сенсорних мереж. Зробили огляд радіоінтерфейсів у бездротових сенсорних мережах. Провели загальну характеристику поширення радіосигналу. Розробили програму.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти до проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що стосується їх

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | |
|--------|-------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання _____

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № п/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Термін виконання проекту (роботи) | Примітка |
|-------|--|-----------------------------------|----------|
| 1. | Аналіз проблеми. Постановка задачі дослідження | | |
| 2. | Моделювання мережі | | |
| 3. | Розробка програми | | |
| 4. | Оформлення пояснювальної записки до дипломної роботи | | |

Студент – дипломник

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

ВСТУП

Актуальність дослідження. Бездротова сенсорна мережа складається з випадково розподілених мікровузлів, інтегрованих із датчиками, блоками обробки даних та комунікаційними модулями. Він складається з методів самоорганізації і може виконувати такі завдання, як збір даних, обробка та передача сигналів за допомогою співпраці між вузлами мережі. Бездротова сенсорна мережа – це мережа Ad-Нос, яка також є розподіленою сенсорною мережею, яка високо інтегрована різними датчиками та керується власною системою. Таким чином, окрім загальних характеристик, таких як мобільність і відключення бездротової мережі, бездротова сенсорна мережа має багато інших відмінних рис: гнучкість, сильну здатність проти перешкод і адаптивність. Вони широко використовуються в будинках і школах, медичних, комерційних, виробничих, оборонних та інших аспектах.

Оскільки все більше і більше дослідників відкривають і застосовують датчики, люди також вивчають і використовують все більш потужні функції. Бездротовий датчик – це технологія, на яку звертає увагу кожна країна, а синхронізація годинника також вважається найважливішою частиною бездротової сенсорної мережі. У розподіленій системі неможливо забезпечити єдиний глобальний годинник для незалежних модулів. Кожен модуль підтримує свій власний місцевий час, що спричиняє дрейф і відхилення через середовище кожного модуля, в результаті чого час спостереження і вузол датчика для запису часу не однакові, і немає гарантії, що час завжди буде синхронізовано після калібрування. Це призведе до низької точності в зборі інформації та доставці інформації, і датчикам потрібна загальна позначка часу для спільної роботи для виконання складних завдань із зондування. Синхронізація годинника також має велике значення для багатьох енергозберігаючих схем. Наприклад, датчик може спати в потрібний час, коли дані надходять, вони можуть бути отримані вчасно, і вузли також повинні спати і прокидатися в один і той же час, звичайно, це також вимагає точного визначення часу між вузлами датчика. Існує багато бездротових сенсорних вузлів, тому ключем до координації співпраці між різними вузлами є

уніфікований годинник, який вимагає, щоб метод синхронізації мав переваги гарної масштабованості, низької вартості та низької складності. Оскільки ініціалізація або зміна факторів середовища призведе до втрати синхронізації годинника вузла і зробить годинник вимірювання неточним, що призведе до незручностей, синхронізація годинника є особливо важливою. Точний розрахунок відхилення та швидкості дрейфу тактового сигналу вузла є ключем до формування тактової синхронізації.

Об'єктом дослідження є бездротові сенсорні мережі.

Предметом дослідження є розвиток інформаційно-комунікаційної технології синхронізації елементів бездротових сенсорних мереж.

Мета – розвиток технології синхронізації в бездротових сенсорних мережах шляхом покращення енергоефективності мережі та показників синхронізації часу, що ставить до виконання таких завдань:

- визначити головні поняття дослідження: «бездротова сенсорна мережа» «датчики» «топология сенсорних мереж» «синхронізація»;
- проаналізувати особливості бездротових сенсорних мереж;
- зробити огляд радіоінтерфейсів у бездротових сенсорних мережах;
- провести загальну характеристику поширення радіосигналу;
- проаналізувати моделі розповсюдження;
- розглянути характеристики проблеми синхронізації тактового сигналу датчика;
- з'ясувати синхронізацію годинника RBS та його вдосконалення;
- порівняти продуктивності різних методів синхронізації час;
- розробити програму.

Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові та спеціальні методи: діалектичний, синтезу, аналізу, порівняння.

Інформаційною базою для написання роботи стали теоретичні розробки науковців, періодичні статті.

Структура роботи. Робота складається з вступу, трьох розділів, списку використаних джерел, додатків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗДРОВОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Визначення головних понять дослідження: «бездротова сенсорна мережа» «датчики» «сенсори» «топология сенсорних мереж» «синхронізація»

Визначимо поняття «бездротова сенсорна мережа». Бездротові сенсорні мережі (WSN) відносяться до мереж просторово розподілених і виділених датчиків, які контролюють і записують фізичні умови навколишнього середовища та пересилають зібрані дані в центральне місце. WSN можуть вимірювати умови навколишнього середовища, такі як температура, звук, рівень забруднення, вологість і вітер [1]

Вони схожі на бездротові ad-hoc мережі в тому сенсі, що вони покладаються на бездротове підключення та спонтанне формування мереж, щоб дані датчиків можна було транспортувати бездротовим способом. WSN відстежують фізичні або навколишні умови, такі як температура, звук і тиск. Сучасні мережі є двонаправленими, вони збирають дані і дозволяють контролювати активність датчиків. Розвиток цих мереж був мотивований військовими застосуваннями, такими як спостереження на полі бою. Такі мережі використовуються в промислових і споживчих додатках, таких як моніторинг і контроль промислових процесів і моніторинг стану машин.

WSN складається з «вузлів» - від кількох до сотень або тисяч, де кожен вузол підключений до інших датчиків. Кожен такий вузол, як правило, складається з декількох частин: радіо приймач з внутрішньої антеною або підключенням до зовнішньої антени, мікроконтролеру, електронній схемі для взаємодії з датчиками і джерелом енергії, як правило, батареєю або вбудованої формою збору енергії. Вузол датчика може відрізнятися за розміром від коробки для взуття до (теоретично) пилу, хоча мікроскопічні розміри ще не зрозумілі. Вартість вузла датчика також змінюється, коливається від кількох до сотень доларів, залежно від складності вузла. Обмеження розміру та

вартості обмежують такі ресурси, як енергія, пам'ять, швидкість обчислень і пропускна здатність зв'язку. Топологія WSN може варіюватися від простої зірчастої мережі до розширеної багатострибкової бездротової мережі. Розповсюдження може використовуватися маршрутизацією або затопленням.

У інформатиці та телекомунікаціях бездротові сенсорні мережі є активною дослідницькою сферою, яка підтримує багато семінарів і конференцій, включаючи Міжнародний семінар із вбудованих мережевих датчиків (EmNetS), IPSN, SenSys, MobiCom та EWSN. Станом на 2010 рік у бездротових сенсорних мережах було розгорнуто приблизно 120 мільйонів віддалених пристроїв по всьому світу [2].

Основні характеристики WSN включають:

- обмеження споживання електроенергії для вузлів, які використовують батареї або збирають енергію (прикладом постачальників є Revibe energy та Perpetuum);
- здатність справлятися зі збоями вузлів (стійкість);
- певна мобільність вузлів (для високомобільних вузлів див. mwsn);
- неоднорідність вузлів;
- однорідність вузлів;
- масштабування до великого масштабу розгортання;
- здатність витримувати суворі умови навколишнього середовища;
- простота використання.

Міжрівнева оптимізація. Перехресний рівень стає важливою сферою вивчення бездротового зв'язку. Крім того, «Традиційний багатосаровий підхід» представляє три основні проблеми:

- 1) не може ділитися різною інформацією між різними шарами, що призводить до того, що кожен рівень не має повної інформації;
- 2) не може гарантувати оптимізацію всієї мережі;
- 3) не має можливості адаптуватися до змін навколишнього середовища.

Через перешкоди між різними користувачами, конфліктами доступу, в бездротових сенсорних мережах традиційний багат шаровий підхід не застосовується.

Таким чином, перехресний рівень можна використовувати для створення оптимальної модуляції для покращення продуктивності передачі, наприклад, швидкості передачі даних, енергоефективності, якості обслуговування (QoS) тощо. Сенсорні вузли можна уявити як маленькі комп'ютери, які надзвичайно базові з точки зору їхніх інтерфейсів та їх компонентів. Зазвичай вони складаються з блоку обробки з обмеженою обчислювальною потужністю та обмеженою пам'яттю, датчиків або MEMS (включаючи специфічні схеми кондиціонування), комунікаційного пристрою (зазвичай радіоприймач) та джерела живлення, як правило, у вигляді батареї. Інші можливі включення, модулі збору енергії, вторинні ASIC і, можливо, вторинний інтерфейс зв'язку (наприклад, RS-232 або USB). [3]

Базові станції є одним або кількома компонентами WSN з набагато більшими обчислювальними, енергетичними та комунікаційними ресурсами. Вони діють як шлюз між сенсорними вузлами та кінцевим користувачем, оскільки вони зазвичай пересилають дані з WSN на сервер. Інші спеціальні компоненти маршрутизації мереж на основі маршрутизаторів, призначені для розрахунку, і розподілення таблиці маршрутизації.

Отож, бездротові сенсорні мережі (англ. *Wireless Sensor Networks*) - це мережа, що складається з розподілених автономних пристроїв, які об'єднуються в вимірювальний пристрій і радіопередавач/приймач. Значення, які можуть вимірюватися у вузлах сенсорної мережі, є, наприклад: температура, тиск, вологість, вібрації, прискорення, хімічний склад речовин (наприклад, атмосфера) тощо. Дані вимірювань можуть бути попередньо оброблені вузлами мережі, а потім передані по радіо до центральних пунктів. [4]

Операційні системи для вузлів бездротової сенсорної мережі зазвичай менш складні, ніж операційні системи загального призначення. Вони більше нагадують вбудовані системи з двох причин:

- по-перше, бездротові сенсорні мережі зазвичай розгортаються з урахуванням конкретної програми, а не як загальна платформа;
- по-друге, потреба в низьких витратах і низькій потужності змушує більшість бездротових сенсорних вузлів мати мікроконтролери з низьким енергоспоживанням.

Тому для сенсорних мереж можна використовувати вбудовані операційні системи, такі як eCos або uC/OS. Однак такі операційні системи часто розроблені із урахуванням актуальності реального часу [5].

TinyOS, розроблена Девідом Каллером, є, мабуть, першою операційною системою, спеціально розробленою для бездротових сенсорних мереж. TinyOS заснована на моделі програмування, керованій подіями, замість багатопоточності. Програми TinyOS складаються з обробників подій і завдань із семантикою від виконання до завершення. Коли відбувається зовнішня подія, наприклад, вхідний пакет даних або зчитування датчика, TinyOS сигналізує відповідному обробнику подій для обробки події. Обробники подій можуть публікувати завдання, заплановані ядром TinyOS через деякий час.

LiteOS - це нещодавно розроблена ОС для бездротових сенсорних мереж, яка забезпечує абстракцію, подібну до UNIX, і підтримку мови програмування C.

Contiki, розроблена Адамом Данкелом, є ОС, яка використовує простіший стиль програмування на C, забезпечуючи такі досягнення, як 6LoWPAN і Protothreads .

RIOT (операційна система) - це новітня ОС реального часу, яка має схожі функції з Contiki.

PreonVM - це ОС для бездротових сенсорних мереж, яка забезпечує 6LoWPAN на основі Contiki і підтримку мови програмування Java.

Визначимо поняття «датчики». У найширшому визначенні датчик - це пристрій, модуль, машина або підсистема, метою якої є виявлення подій або змін у навколишньому середовищі та надсилання інформації іншій електроніці, часто комп'ютерний процесор. Датчик завжди використовується з іншою електронікою.

Датчики використовуються в повсякденних об'єктах, таких як чутливі до дотику кнопки ліфта (тактильний датчик) і лампи, які тьмяніють або освітлюються при дотику до основи, крім незліченних застосувань, про які більшість людей навіть не підозрюють. Завдяки досягненню мікромашин і простих у використанні платформ мікроконтролерів, використання датчиків вийшло за межі традиційних сфер вимірювання температури, тиску або витрати [6], наприклад, у датчики MARG. Крім того, аналогові датчики, такі як потенціометри та силові резистори досі широко використовуються. Застосування включають виробництво та обладнання, літаки та аерокосмічні засоби, автомобілі, медицину, робототехніку та багато інших аспектів нашого повсякденного життя. Існує широкий спектр інших датчиків, які вимірюють хімічні та фізичні властивості матеріалів. Кілька прикладів включають оптичні датчики для вимірювання показника заломлення, вібраційні датчики для вимірювання в'язкості рідини та електрохімічні датчики для моніторингу рН рідин.

Датчик вказує, наскільки змінюється вихідний сигнал, коли змінюється вхідна величина, що вимірюється. Наприклад, якщо ртуть у термометрі рухається на 1 см, коли температура змінюється на 1 °С, чутливість дорівнює 1 см/°С (це в основному нахил dy/dx , що приймає лінійну характеристику) [7].

Технічний прогрес дозволяє виготовляти все більше датчиків у мікроскопічному масштабі як мікросенсори за технологією MEMS. У більшості випадків мікросенсор досягає значно швидшого часу вимірювання та більшої чутливості порівняно з макроскопічними підходами. Через зростаючий попит на швидку, доступну та надійну інформацію в сучасному світі останнім часом зростає кількість одноразових датчиків - недорогих і

простих у використанні пристроїв для короткострокового моніторингу або одноразових вимірювань. Використовуючи цей клас датчиків, будь-хто, будь-де і в будь-який час може отримати важливу аналітичну інформацію без необхідності повторного калібрування та турботи про забруднення.

Визначимо поняття «топологія сенсорних мереж». Сенсорні мережі також можна описати їх логічною топологією - методом, який вони використовують для переміщення даних по мережі [8].

У топології спільного медіа всі вузли можуть отримати доступ до транспортного медіа, коли захочуть. Це може призвести до зіткнень, якими необхідно керувати за допомогою протоколу уникнення зіткнень. Ця логічна топологія використовується в мережах з шинною, зірчастою або гібридною фізичною топологією через їх спільну шину даних або спільний вузол.

У логічному протоколі на основі маркерів, маркер передається по мережі. Якщо вузол хоче надіслати дані, він повинен отримати маркер з мережі. Коли дані надходять до місця призначення, маркер звільняється і продовжує подорожувати по мережі. Метод маркера є найбільш корисним у кільцевій топології.

Лінійна топологія є двостороннім зв'язком між декількома вузлами. У кінці мережі є два кінцеві вузли, які мають єдине підключення до сусіднього вузла. У цій топології вузли залежать один від одного для поширення повідомлення до наступного вузла. Якщо вузол виходить з ладу, усі вузли, підключені до цього вузла, відключаються від мережі.

Кільцева топологія (Рис. 1.2.) - це мережа, налаштована по колу. Це схоже на лінійну топологію, в якій кінцеві вузли з'єднані один з одним. У цій конфігурації кожен вузол з'єднується точно з двома іншими вузлами, і дані надходять в одному напрямку від джерела до кожного вузла, поки не знайде передбачуваного одержувача. Цю топологію легко встановити та переналаштувати. Однак управління дороге, оскільки кільцева мережа може бути порушена через збій одного вузла. Багато мереж додають друге кільце зв'язку, яке може передавати дані в протилежному напрямку, щоб подолати

цю проблему. Ця топологія була звичайним способом зв'язування невеликих офісів і шкіл, але вона рідко використовується [9].

Топологія «зірка» (Рис. 1.1.) складається з одного «центрального вузла», такого як концентратор або комутатор, до якого підключається кожен вузол мережі. Цю топологію легко спроектувати, реалізувати та розширити. Весь трафік даних проходить через центральний вузол, тому потрібен розумний центральний вузол. Вихід з ладу цього вузла призведе до виходу з ладу всієї мережі. Топологія мережі зірка є однією з найпоширеніших топологій сенсорної мережі. Поширеним прикладом цієї топології є бездротова персональна мережа (WPAN), що складається зі смартфона, підключеного до кількох бездротових датчиків.

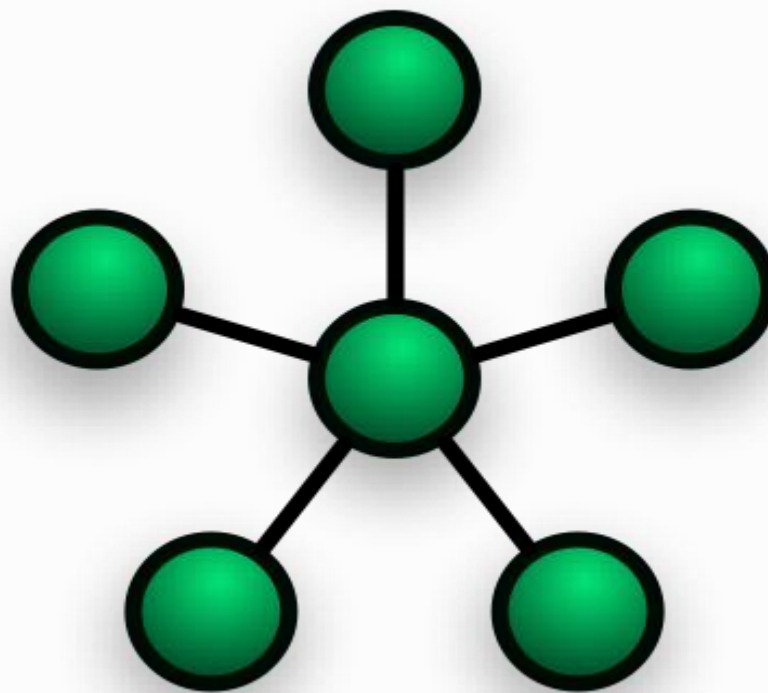


Рис. 1.1. – Топологія «Зірка»

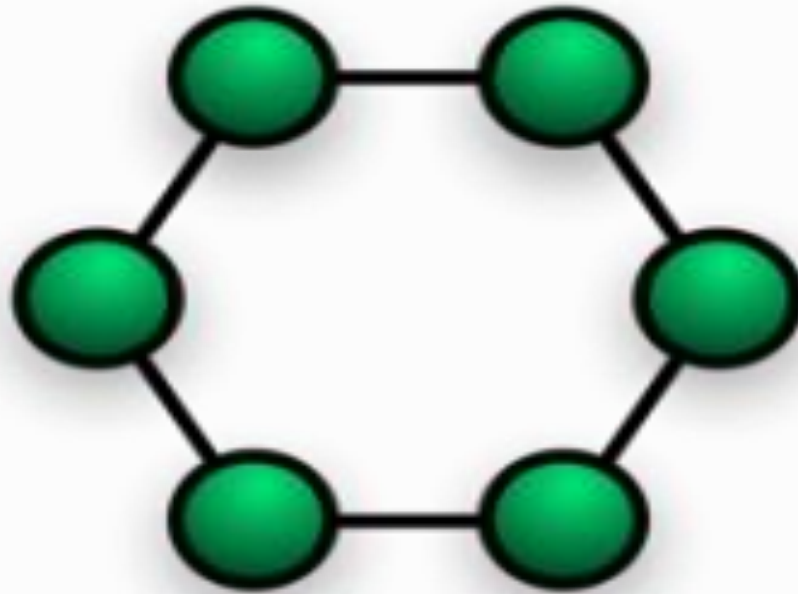


Рис. 1.2. – Топологія «Кільце»

Топологія «дерева» - це ієрархія вузлів, у якій найвищим рівнем ієрархії є один «кореневий вузол», і цей вузол з'єднаний з одним або багатьма вузлами на нижньому рівні. Топологія дерева може містити багато рівнів вузлів. Обробка та потужність у вузлах збільшуються, коли дані рухаються від гілок дерева до кореневого вузла, що дозволяє обробляти дані поблизу місця їх створення. Ця топологія масштабована, а проста структура дозволяє легко ідентифікувати та ізолювати несправності. Мережами «дерев» стає все важче керувати, оскільки вони збільшуються .

Вузли топології «сітки» (Меш -мережі) поширюють власні дані, а також діють як реле для поширення даних з інших вузлів. Існують дві форми топології сітки: частково зв'язана сітка, в якій деякі вузли з'єднані з більш ніж одним іншим вузлом і повністю зв'язана сітка, в якій кожен вузол з'єднаний з кожним іншим вузлом сітки. Меш -мережі самовідновлюються, оскільки дані можуть бути перенаправлені по іншому шляху, якщо вузол виходить з ладу. Повністю підключені сітчасті мережі не підходять для великих сенсорних мереж, оскільки кількість необхідних з'єднань стає некерованою. Частково

підключені мережі забезпечують можливість самовідновлення повністю підключеної мережі без накладних витрат підключення. Mesh-топології найчастіше зустрічаються в бездротових мережах.

Визначимо поняття «синхронізація». Синхронізація - це координація подій для одночасного управління системою. Наприклад, диригент оркестру підтримує оркестр синхронно або вчасно. Системи, які працюють з усіма частинами в синхронному режимі, називаються – синхронними або синхронізованими, а ті, що не є – асинхронними. [10]

1.2. Особливості бездротових сенсорних мереж

Перші застосування сенсорних мереж нерозривно пов'язані з військовими застосуваннями, які використовувалися як інструменти для виявлення переміщення ворожих підрозділів у певній місцевості. Однак область застосування швидко розширилася, включивши в неї цивільні програми. В даний час бездротові сенсорні мережі в основному використовуються в:

- моніторинг параметрів навколишнього середовища;
- відстеження звичок різних видів тварин;
- сейсмографічні додатки;
- програми контролю доступу та спостереження;
- розумні будівлі;
- спостереження за станом здоров'я пацієнтів і постраждалих від нещасних випадків;
- контроль промислових процесів.

Кожен вузол сенсорної мережі може мати один або більше датчиків. Це можуть бути, наприклад, датчики температури, вологості, тиску, випромінювання, прискорення і т. д. Електричний сигнал від датчика перетворюється в цифрову форму і поширюється в мережі відповідно до прийнятого протоколу передачі. Мікроконтролер, який є містком між

датчиками та радіосистемами, відповідальними за передачу та прийом, відповідає за обробку вимірювань та передачу даних. Найбільш часто використовуваними діапазонами частот у додатках є діапазони ISM (промислові наукові та медичні): 433 МГц, 866 МГц і 2,4 ГГц, хоча, звичайно, використовуються й інші .

Вузли бездротової сенсорної мережі вимагають автономного джерела живлення. Найчастіше це акумулятор. Його потужність визначає термін служби вузлів. Залежно від споживання енергії та типу акумулятора вузли мережі можуть працювати від кількох годин до кількох років. Новітні рішення передбачають можливість поповнення ресурсів енергією, отриманою з навколишнього середовища, шляхом використання перетворювачів, що перетворюють кінетичну, теплову або сонячну енергію в електричну. Проте, завжди важливо мінімізувати споживання енергії за рахунок відповідного апаратного дизайну, вибору алгоритмів вимірювання та контролю, а також належної організації передачі даних у мережі (протокол зв'язку) [11]

Залежно від вимог використовуються різні топології сенсорної мережі. Найпростішою є зіркова мережа, в якій всі вузли спілкуються з однією центральною точкою (базовою станцією). Це мережі з одним стрибком, де пакет даних прямує від відправника до одержувача. Якщо контрольована зона більше, ніж діапазон передачі одного вузла, то необхідно використовувати мережу з кількома стрибками, де пакет даних передається між кількома вузлами до того, як досягне адресата. Тому виникає проблема пошуку оптимального маршруту передачі пакетів (маршрутизації). У цьому випадку решітка вже не є зірчастою і навіть може мати дуже складну та змінну у часі структуру. Популярні топології сенсорної мережі: а) зірка, б) «дерево» [12].

У разі великих і глобальних мереж використовується групування вузлів у підмережі. У даній підмережі (так званому кластері) вибирається один центральний вузол, який може спілкуватися з іншим центральним вузлом сусіднього кластера. Таким чином, кількість вузлів, які можуть спілкуватися один з одним, обмежена, що покращує контроль шляху для пакетів даних. Це

суттєво впливає на споживання енергії. Проблема полягає в підвищеній активності центрального вузла, через який повинні проходити всі пакети, якими обмінюються кластери. Він автоматично споживає більше енергії, ніж інші вузли мережі. Щоб зменшити ці диспропорції, час від часу функцію центрального вузла виконує (наприклад, випадково) інший вузол мережі .

Сценарій використання бездротових сенсорних мереж дуже часто схожий. Вони розміщені в різних точках певної території, часто дуже віддалених географічно. Потім, обмінюючись інформацією за радіопротоколом, ці пристрої «відкривають» своїх сусідів, з якими вони можуть спілкуватися. Починається створюватися карта логічних мережевих з'єднань. На його основі можна шукати найкращий шлях для пакетів даних з точки зору прийнятого критерію, наприклад споживання енергії, кількості проміжних вузлів, часу передачі тощо. Ця мережа з'єднань може бути постійною або динамічно змінюватися зі зміною умови поширення, переміщення об'єктів на маршруті, поширення хвилі або переміщення самих вузлів мережі. У цьому випадку важливо забезпечити постійний зв'язок між пристроями.

Дані вимірювань, зібрані вузлами сенсорних мереж, зазвичай тісно пов'язані з областю, в якій розташований вузол. Прикладом можуть бути системи контролю доступу, де активність виявляється в певному місці (наприклад, датчики руху, розміщені в коридорі), однак часто невідомо, де саме був розміщений датчик, тому необхідно визначити його положення. Цей процес часто називають визначенням місцезнаходження мережевих вузлів. Застосовані рішення засновані на вимірюванні часу поширення радіохвилі та вимірюванні рівня потужності, що приймається. Більш точні результати можна отримати за допомогою технології GPS, але вона дорога і може мати негативний вплив на споживання енергії. Альтернатива, яка особливо добре працює у випадку чітко визначених просторів (наприклад, інтер'єри будівель) - це використання маяків, які випромінюють унікальні сигнали, наприклад, різної частоти або тривалості. Вузол, який отримує сигнал від таких маяків,

може визначити своє положення на основі, наприклад, вимірювань рівня потужності та частоти.

Використання бездротових сенсорних мереж дозволяє вимірювати ряд фізичних параметрів практично на будь-якій великій території, забезпечуючи високу гнучкість і широкий спектр варіантів конфігурації. Умілий підбір рішень дозволяє швидко скласти надійні мережі, які можуть працювати без нагляду дуже тривалий час. Однак надмірно розширений функціонал негативно впливає на споживання енергії та призводить до скорочення терміну служби вузлів мережі. Часто виявляється, що варто створити власні додатки, адаптовані до конкретних вимог. Зазвичай це дозволяє досягти бажаного компромісу між конфліктуєчими параметрами мережі (наприклад, тривалим часом роботи та високою пропускну здатністю), недоступними для стандартних рішень. Звідси безліч ідей щодо, наприклад, організації потоку даних у мережі [3].

Бездротові сенсорні мережі (WSN) складаються з великої кількості вузлів. Вузол слід розуміти як сам сенсор з комунікаційним інтерфейсом, а також пристрої, що агрегують інформацію, надіслану від окремих датчиків і пристроїв, які знаходяться на інтерфейсі між WSN та (комп'ютерною мережею) мережами передачі даних або в більш широкому аспекті - Інтернет. У такій мережі датчики найчастіше спілкуються в режимі ad-hoc або один з одним – надсилаючи інформацію про вимірювання через проміжні вузли на вищій рівні системи, або безпосередньо з точки доступу, створюючи таким чином бездротову самоорганізуючу сенсорну мережу. Для того, щоб зменшити навантаження на інтерфейси зв'язку, а отже - зменшити енергоспоживання всього процесу і таким чином продовжити термін їх служби, дані вимірювань попередньо обробляються у вузлах вимірювання і надсилаються тільки на вищій рівні системи (через вузли доступу - вузол-приймач). Там вони агрегуються та обробляються для візуалізації даних вимірювань у додатках вищого рівня та – залежно від вимог – інформація зберігається з вимірювальних вузлів у спеціальних базах даних. Крім того,

вищезгадані точки доступу також діють як шлюзи до інших мереж і систем. Інфраструктура магістральної системи повинна включати, крім пристроїв/додатків для візуалізації даних вимірювань і систем баз даних, також системи моніторингу роботи окремих компонентів у нижніх шарах обговорюваної системи [13].

Наведений вище опис, незважаючи на високий рівень загальності, має представити основні відмінності між бездротовими сенсорними мережами та класичними мережами ІКТ. Однак цей опис не відповідає всім додаткам систем WSN і може істотно відрізнятися в залежності від вимог їх користувачів, а також від призначення даної сенсорної мережі.

1.3. Радіоінтерфейси у бездротових сенсорних мережах

У зв'язку з необхідністю забезпечення зв'язку між окремими компонентами WSN, а також з точками доступу та вищими рівнями системи, необхідно оснастити окремі вузли інтерфейсами (зазвичай радіо), що забезпечують взаємний зв'язок між окремими вузлами.

Через дуже широкий спектр їх поширення та багату літературу з цього питання, найпопулярніші системи бездротового радіозв'язку та стандарти в бездротових сенсорних мережах були представлені лише спочатку, зосереджено головним чином на бездротових інтерфейсах, призначених для забезпечення зв'язку між окремими вимірювальними вузлами. Конкретні стандарти представлені - від найвищих рівнів системи до рівня, що забезпечує зв'язок між окремими датчиками, що вимірюють конкретні фізичні величини. Проте основний акцент був зроблений на рішеннях для забезпечення зв'язку на найнижчому рівні – між окремими вузлами вимірювання.

Стандарт Bluetooth (BT), створений 26 червня 1999 року (дата, коли Bluetooth Special Interest Group опублікувала специфікацію Bluetooth 1.0) і розроблений до сьогодні, призначений для забезпечення підключення на коротких відстанях (теоретично до 100 м).

На сьогоднішній день розроблено кілька версій стандарту:

- Bluetooth 1.0,
- Bluetooth 1.1
- Bluetooth 1.2
- Bluetooth 2.0
- Bluetooth 2.1 + EDR,
- Bluetooth 3.0 HS
- Bluetooth 4.0
- Bluetooth 4.1
- Bluetooth 4.2
- Bluetooth 5
- Bluetooth 5.1
- Bluetooth 5.2 [14].

У 2002 році IEEE адаптував роботу Bluetooth SIG на Bluetooth 1.1 специфікації та стандарту 802.15.1, який де-факто є першим стандартом для персональних мереж. Через свою специфіку та оригінальне призначення стандарт Bluetooth наразі не застосовується в бездротових сенсорних мережах через відносно високу потребу в енергії. Однак у деяких додатках WSN варто звернути увагу на стандарт Bluetooth як інтерфейс обміну даними, через його потенціал розвитку та високу популярність. Радіоінтерфейс Bluetooth працює в діапазоні 2,4 ГГц (ISM - Industrial, Scientific and Medical), які ліцензії на використання цього діапазону. Стандарт Bluetooth був розроблений для реалізації в основному з'єднань «точка-точка» і створення мереж піко- і розсіяних мереж [15].

Розглянемо різні види радіоінтерфейсів такі як Wibree, ZigBeeStandard, Dash7 та інші.

Мережі Piconet можуть складатися з семи активних вузлів і одного вузла, що працює в режимі ведучого, що забезпечує синхронізацію пристроїв, що працюють у веденому режимі. Крім того, стандарт Bluetooth дозволяє створити мережу пікомереж, що містить до 254 модулів, але лише 7 з них

перебувають у активному режимі, а решта в режимі очікування – таким чином вони не беруть участі в обміні даними в межах даної пікомережі. При дотриманні відповідних умов активний модуль може перейти в режим очікування, а модуль очікування може почати обмін даними протягом цього часу. Варто пам'ятати, що головний модуль відповідає за доступ до фізичних каналів, як для активних, так і для непрацюючих підлеглих модулів [16]. Стандарт Bluetooth також дозволяє працювати кільком пікомережам в одній загальній зоні. Потім робота окремих пікомереж відбувається в різних фізичних каналах і з використанням окремих послідовностей стрибкоподібної зміни частоти (Slow Frequency Hopping) для кожної пікомережі. Щоб забезпечити належне отримання пакетів даних, кожен пакет, надісланий в межах однієї пікомережі, оснащений унікальним кодом доступу до каналу (CAC - Chanel Access Code), створеним на основі унікальної адреси головної станції - провідника у даній пікомережі.

Безсумнівним недоліком такої щільності пікомереж на відносно невеликому просторі є підвищена ймовірність зіткнень пакетів. Явище зіткнення виникне, коли дані передаються двома окремими пікомережами в одному часовому інтервалі і на тій самій частоті. Це явище має руйнівний вплив на пропускну здатність мережі. Інший режим роботи модуля Bluetooth – це режим, в якому один модуль ВТ працює в двох пікомережах, розташованих в одній зоні. У мережі «пікомережа А» працює як провідна, а в мережі «пікомережа В», як підпорядкована – тоді така мережа називається розсеченою. Такий режим роботи можливий, наприклад, коли ведучий в мережі «пікомережа А» викликається головним модулем ВТ в мережі «пікомережа В» - в цьому режимі головний модуль ВТ «пікомережі А» є підпорядкованим модулем «пікомережі В».

Wibree. Модифікацією стандарту Bluetooth, розробленою концерном Nokia наприкінці 2006 року, є інтерфейс Wibree. Як і Bluetooth, Wibree працює в діапазоні ISM (2,4 ГГц) і підтримує топологію мережі, що складається з 7 активних ведених вузлів і одного головного вузла. Основна відмінність -

порівняно з Bluetooth - це зниження споживання електроенергії та ціна за одиницю трансивера. Це досягнуто за рахунок зменшення максимальної потужності передачі модулів передачі та зниження швидкості передачі даних. За словами представника концерну, в результаті лабораторних досліджень рівень потужності, що передається, знизився до рівня 10% потужності Bluetooth-пристроїв. Wibree можна використовувати всюди, де використання технології Bluetooth є економічно невиправданим, або там, де є потреба в рішеннях з мінімальним споживанням енергії. Зрештою, стандарт Wibree нещодавно був включений до групи стандартів Bluetooth [17].

ZigBeeStandard. ZigBee був розроблений як альтернатива вищезазначеним рішенням, щоб забезпечити радіозв'язок у системах WSN, які не вимагають високої пропускну здатності радіоінтерфейсу, але великої кількості окремих вузлів, що працюють у мережі WSN (до 65 535 вузлів). Крім того, впровадження ZigBee є відносно дешевим – саме тому він широко використовується, серед іншого, у системах віддаленого моніторингу, автоматизації будівель тощо – існуючі рішення, такі як Bluetooth або WiFi, виявилися занадто дорогими та надто складними у реалізації. У травні 2003 року IEEE завершив роботу над стандартом 802.15.4, надійною реалізацією якого є ZigBee. Вищі рівні визначаються ZigBee Alliance (2004 - перша специфікація ZigBee), яка продовжувала свою роботу протягом наступних років, щоб створити розширену специфікацію ZigBee - ZigBee PRO в 2007 році. Ще одна серйозна модифікація стандарту відбулася в 2009 році - тоді діючий стандарт був поширений на багато різних областей.

Модуляція O-QPSK (Offset-Quadrature Phase-Shift Keying) була використана в діапазоні 2,450 ГГц. У діапазонах 915 МГц і 868 МГц швидкість передачі становить 40 кбіт/с і 20 кбіт/с, модуляція BPSK (двійкова фазова маніпуляція) і DSSS (прямий спектр поширення послідовності) відповідно [18]. Каналовий рівень визначає метод доступу до мережі та спосіб передачі кадрів. Доступ до мережі надається двома способами:

- 1) ширококомовний (маяковий) - передача даних відбувається пристроями, що працюють у безперервному режимі;
- 2) без маяка - використовується в середовищі з пристроями, що передають дані періодичним/випадковим чином. У цьому режимі пристрої використовують протокол CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access - CollisionAvoidance) для доступу до фізичного носія.

Крім того, канальний рівень даних виконує завдання, пов'язані з маршрутизацією пакетів, управлінням топологією мережі та виявленням нових вузлів і забезпеченням безпеки зв'язку (за допомогою алгоритму AES-128) [19].

MiWiTechnologia - це простіша версія стандарту ZigBee, заснована на трансивері, сумісному зі стандартом IEEE 802.15.4. Технологія MiWi призначена для рішень бездротової сенсорної мережі, які не вимагають високої пропускної здатності радіоінтерфейсу і відносно невеликих - за кількістю - вузлів. Кількість вузлів у такій сенсорній мережі не повинна перевищувати 1024. Подібно до ZigBee - MiWi підтримує мережі з топологією сітки або зірки. Крім того, MiWi підтримує лише режим роботи без трансляції. Іншою відмінністю по відношенню до ZigBee є зменшений стек протоколів, які підтримує контролер – це знижує ціну за одиницю контролера приблизно на 40–60% порівняно з контролером ZigBee.

Z-WaveStandard. Z-Wave розглядається як модифікація стандарту ZigBee. Z-Wave не змінює фізичний рівень і канал передачі даних - вони сумісні зі стандартом IEEE 802.15.4. Крім того, на відміну від ZigBee, це менша вихідна потужність передавача і інший діапазон частот - ISM 900 МГц (точно: 868,42 МГц і 915 МГц). Модифікація Z-Wave була розроблена в основному для програм керування домашньою автоматизацією. Одна мережа Z-Wave може складатися з не більше ніж 232 вузлів, що працюють у мережах сітчастої або зіркової топології [20].

Dash7. Dash7 є відносно новим радіоінтерфейсом порівняно з раніше обговореним. Основою для створення цього інтерфейсу є стандарт ISO18000-

7, присвячений радіопристроєм, що працюють на дуже низькій потужності (РЧ). Dash7 працює в діапазоні 433 МГц - це призводить до хорошого проникнення в закриті об'єкти, такі як будинок, або в середовищах з високим рівнем вологості (наприклад, моніторинг сільськогосподарських угідь). Ще однією перевагою цього радіоінтерфейсу є його відносно великий діапазон – у випадку Dash7 діапазон масштабується, і його можна змінювати в діапазоні від 10 м до 2000 м. Пам'ятайте, що передавач Dash7 працює з вихідною потужністю приблизно у 10 разів менше, ніж стандарт ZigBee, призначений для додатків у бездротових сенсорних мережах. Таке значне зниження випуску основного корпусу передавача дозволяє значно продовжити час роботи окремого вузла на одній батареї. Крім того, відносно великий діапазон спрощує топологію сенсорної мережі, що означає, що можна обійтися без проміжних вузлів між датчиком, що вимірює конкретну фізичну величину, і точкою агрегації даних. Звичайно, відповідно до ISO 18000-7, Dash7 має функціональність повторної передачі даних з вузлів поза межами досяжності. Крім того, цей стандарт дозволяє передачу даних на основі протоколу IPv6, що, незважаючи на деякі поточні труднощі у реалізації IPv6, не залишиться без значення в найближчому майбутньому. Особливо якщо врахувати виділення IANA (Internet Assigned Numbers Authority) у лютому 2011 року останніх груп IPv4-адрес кожному RIR (регіональному реєстру Інтернету) та постійно зменшуваному пулу адрес IPv4, доступних у RIR. Радіо Dash7 інтерфейс використовує від 1 до 5 дискретних каналів у смузі частот 433,04-434,79 МГц (з FSK або GFSK модуляцією) [21]. Теоретична пропускна спроможність інтерфейсу оцінюється в 100 кбіт/с, однак номінальне значення в кілька разів нижче і становить 27,8 кбіт/с - за словами авторів, цього значення достатньо для більшості додатків WSN і RFID.

SyFiInterface. SyFi – це широкопasmовий бездротовий радіоінтерфейс, що працює в діапазоні 2,4 ГГц ISM, використовуючи технологію розширення спектру (DSSS). Пропускна здатність інтерфейсу становить від 125 кбіт/с, 250 кбіт/с або 1 Мбіт/с. Важливою характеристикою цього інтерфейсу є

динамічний контроль потужності передавача, що в поєднанні з активним керуванням з'єднанням дозволяє значно подовжити час роботи WSN вузла, оснащеного СуFі. Цей інтерфейс реалізує підключення в бездротових мережах у топології «зірка», що складається з однієї базової станції (хаба) і до 250 вузлів. За запевненнями виробника [22], СуFі дозволяє встановлювати з'єднання LoS (Line of Sight) між вузлами на відстані до 1000 метрів (залежно від зовнішніх умов).

WiBroWiBro (Wireless Broadband) - південнокорейська модифікація стандарту IEEE 802.16e (Mobile WiMax), що дозволяє подолати обмеження швидкості пересування мобільних вузлів до 120 км/год, забезпечуючи при цьому відносно високу швидкість передачі даних - досягаючи 30 -50 Мбіт/с на відстані до 5 км від базової станції [23]. Цей інтерфейс, незважаючи на значне споживання електроенергії, може надавати послуги для потреб WSN, як точки взаємозв'язку бездротової сенсорної мережі з центрами агрегації та обробки даних з WSN [24].

Бездротові сенсорні мережі використовуються в багатьох нових секторах економіки, починаючи від військового застосування, через усі види систем моніторингу критичної інфраструктури і закінчуючи медичними додатками, охороною навколишнього середовища та іншими. Тому важливим аспектом є вибір відповідних радіоінтерфейсів таким чином, щоб забезпечити безпечний та ефективний зв'язок між усіма вузлами даної сенсорної мережі

Автори усвідомлюють, що не надали інформацію про всі можливі рішення радіоінтерфейсів, які можна використовувати в бездротових сенсорних мережах - деякі з них добре відомі (наприклад, стандарти WiFi, WiMax або GSM / UMTS / HSPA / LTE для мобільних пристроїв).

1.4. Постановка задачі роботи

Зростання бездротових сенсорних мереж частково стало результатом вимог до підключення датчиків і прогресу в радіотехнологіях. Вузли WSN можуть знадобитися, щоб заощадити енергію і, отже, прокидатися та спати синхронізовано. Останнім часом спостерігається зростання тенденції до розгортання WSN, де велика кількість крихітних пристроїв, які взаємодіють зі своїм середовищем, можуть бути об'єднані в мережу та доступні через Інтернет.

WSN складаються з сенсорних пристроїв, оснащених власним локальним годинником для внутрішніх операцій. Пов'язані з ними події, які включають виявлення, обробку та зв'язок, зазвичай асоціюються з інформацією про час. У конкретному випадку WSN існують проблеми та фактори, пов'язані з синхронізацією вузлів, які включають недорогі годинники, наслідки бездротового зв'язку та збої вузлів. Крім того, WSN є розподіленими, і їхні вузли мають численні апаратні та програмні обмеження, такі як низька потужність обробки, низькі можливості пам'яті та зберігання, а також низьке енергоспоживання. Ці характеристики роблять синхронізацію часу важливою частиною зв'язку в WSN, і необхідні протоколи синхронізації.

Отже, постановку задачі можна сформулювати наступним чином:

У цій кваліфікаційній магістерській роботі ми пропонуємо керований додатком механізм синхронізації вузла бездротових сенсорних мереж, який, використовуючи міжрівневу інформацію, таку як ідентифікатор програми та робочий цикл, а також за допомогою техніки експоненціально зваженої ковзної середньої (EWMA), дозволяє вузлам прокидатися і спати без втрати синхронізації. Отримані результати підтверджують, що цей механізм підтримує синхронізацію вузлів у сітчастій мережі відповідно до програм, які вони запускають, зберігаючи при цьому високий коефіцієнт прийому пакетів.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГОДИННИКА В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

2.1 Загальна характеристика поширення радіосигналу

Система зв'язку в основному складається з передавача і приймача, які спілкуються через канал поширення. «Бездротовий» канал поширення відноситься до інформаційного транспортного середовища, що використовується для зв'язку: обмін інформацією здійснюється акустичними, оптичними засобами (інфрачервоний, лазерний тощо) або радіо. У цьому параграфі ми будемо використовувати вираз бездротовий або радіозв'язок для позначення систем радіопередавання, що використовують мікрохвильові канали. Бездротовий зв'язок здійснюється через радіозв'язок, що дозволяє приймачу отримувати радіосигнал, переданий передавачем. Поведінка цієї радіолінії, а також якість сигналу, що приймається приймачем, значною мірою залежать від характеристик каналу поширення. У цьому розділі ми опишемо радіосистему, параметри радіосигналу, а також його поведінку в середовищі поширення. Фактори середовища поширення сигналу впливають на продуктивність радіосистеми, змінюючи якість радіозв'язку. Тому знання цих елементів дуже важливо для визначення розмірів бездротових рішень, вибору фізичних параметрів системи, а також дизайну.

Радіосистеми передають інформацію в електромагнітному сигналі, що передається по каналу. Цей сигнал характеризується, зокрема, частотою та потужністю передачі. Дійсно, для відправки інформації відправник використовує інформацію, що підлягає передачі, для модуляції однієї або кількох характеристик цього сигналу, щоб адаптувати його до використовуваного каналу. Існує модуляція, високочастотна транспозиція посилення, щоб зробити передачу надійною та менш вразливою до перешкод, наявних у середовищі поширення. Однак приймач отримує сигнал, який порушується і ослаблюється загасаннями через властиві характеристики каналу. Ці явища ускладнюють вилучення інформації, можуть призвести до

помилки або навіть зробити передану інформацію незрозумілою. Загасання сигналу пов'язане з різними фізичними явищами: ослабленням через «втрату шляху», вибірконим загасанням, «затуханням», перешкодою або маскуванням «затінення», дифузією та розсіюванням відбиття. Отриманий сигнал є сумою копії переданого сигналу, що проходить через різні шляхи і зазнає різного загасання.

Для того, щоб сигнал був виявлений і успішно використаний радіоприймачем, він повинен відповідати певним обмеженням. Таким чином, відношення сигнал/шум S/N (відношення сигнал/шум), виміряне під час прийому, має бути більше заданого порогу. Це співвідношення можна виразити формулою E_s / N_0 , де E_s представляє енергію переданого біта, а N_0 – це щільність шуму на каналі. Приймач характеризується чутливістю, робочим порогом, вище якого має знаходитися відношення сигнал/шум, щоб прийнятий сигнал був зрозумілим [25].

Шум завжди існує на каналі, навіть за відсутності будь-якого сигналу. Цей шум називається фоновим шумом, і він, зокрема, пов'язаний з тепловим хвилюванням, «тепловим шумом» електронів у провіднику або в компонентах, що використовуються в ланцюгу передачі, його спектральної щільності потужності $N_0 = kT$, де k – константа Больцмана ($k = 1,3810 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), а T — температура в Кельвінах.

Іншим важливим елементом бездротової системи є діапазон радіозв'язку. Вона визначається як максимальна відстань, на якій можливий зв'язок між передавачом і приймачем. Тоді охоплення передавача часто апроксимується колом, радіус (d) якого є максимальною відстанню. На практиці, щоб задовольнити заданий рівень помилок, діапазон радіолінії залежить від трьох елементів: потужності передавача, умов поширення та чутливість приймача.

Налаштування каналу. Радіоканал дуже часто характеризується центральною частотою і смугою пропускання. Ці дві властивості визначають фізичні характеристики радіоканалу та сигналу, який по ньому поширюється.

Висока частота забезпечує меншу стійкість сигналу до загасання. Однак діапазони високої частоти зазвичай мають велику пропускну здатність і, отже, забезпечують високу пропускну здатність.

Однак на них сильно впливає явище поглинання, яке є більш інтенсивним і пропонує слабкий радіодіапазон [26].

Вибір діапазону частот є вирішальним у проектуванні високопродуктивної радіосистеми. Він повинен враховувати потужність передачі, розмір антени, робоче середовище (і потенційну наявність перешкод) і діючі норми. Фактично, кожна держава визначає потужності передачі, дозволені коефіцієнти зайнятості для заданих діапазонів частот.

Бездротові сенсорні мережі найчастіше працюють у вільних діапазонах частот ISM, наприклад, з обмеженою потужністю передачі. Термін ISM позначає всі діапазони, призначені для розробки неліцензованих радіосистем для наукових, медичних або промислових цілей.

Використання цих діапазонів частот визначається регулюючим органом телекомунікацій. У Франції, наприклад, Національне агентство частот (ANF) визначає кілька діапазонів ISM. Серед них найбільш використовувані: 433,050 МГц - 434,790 МГц, 868,7 МГц - 869,2 МГц, 2,400 ГГц - 2,500 ГГц і 5,725 ГГц - 5,875 ГГц Floch and Pinson (1990).

Він також визначає ефективну випромінювану потужність (ERP) і тимчасову заповнюваність, дозволена для кожного діапазону. Наприклад, діапазон 433 МГц обмежений 10 мВт для робочого циклу 10%. Діапазон 868 МГц використовується в Європі, і відповідає діапазону 915 МГц, який використовується в США та інших країнах світу.

Залежно від технології або потреб програми, діапазони частот можна розділити на кілька каналів, кожен з яких характеризується центральною частотою і смугою пропускання. Стандарт IEEE 802.15.4, наприклад, визначає 27 каналів, розподілених у трьох різних діапазонах: 16 каналів у діапазоні 2,4 ГГц, 10 каналів у діапазоні 915 МГц і один канал у діапазоні 868 МГц. Поділ діапазонів на різні канали в певному контексті застосування дозволяє

ефективно використовувати доступні радіоресурси та забезпечує кращу якість обслуговування. Це відкриває можливість для радіотерміналів, які знаходяться в радіусі дії один одного, здійснювати одночасну передачу по різних каналах. Це також дозволяє співіснувати різним радіосистемам на одному діапазоні частот з різними вирізами та центральними частотами та каналами, що не перекриваються. Використовуючи методи керування співіснуванням, термінали різних технологій можуть уникнути одночасного використання каналів, що перекриваються. Наприклад, Bluetooth використовує техніку, яка називається АРН «Адаптивне перестрибування частоти», щоб ідентифікувати та уникнути стрибків на шумних каналах, ймовірно, використовується іншими технологіями, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц, як правило, WiFi.

Діапазон ISM 433 МГц привертає все більше інтересу до малопотужних бездротових мереж. Це діапазон ISM, що характеризується використанням низьких частот, доступна пропускна здатність є більшою, ніж у діапазонах 868 або 915 МГц. Таким чином, він пропонує кращі характеристики поширення, зокрема, для стійкості перед обличчям згасання через складні умови поширення, наприклад, у обмеженому середовищі. З іншого боку, ця стрічка дуже насичена домашніми програмами, такими як пульти дистанційного керування чи дитячі іграшки, до того ж її використання не у всіх країнах гармонізовано.

Підсумовуючи вище сказане, проектування та визначення розмірів бездротових сенсорних мереж вимагає характеристики радіосигналу та знання впливу робочого середовища на їх поведінку. Зіткнувшись з різними загасаннями через умови в середовищі поширення, поширення радіосигналу має здійснюватися надійно, щоб гарантувати якість радіозв'язку. Це можна зробити шляхом вибору відповідних параметрів (діапазон частот, потужність передачі тощо) та/або впровадження різних методів, щоб мінімізувати або уникнути явищ загасання.

2.2 Моделі розповсюдження

Явища, пов'язані з погіршенням радіосигналу під час його передачі, є складними і їх важко контролювати. Вони змінюються дуже складно, часто називаються випадковою поведінкою, у часі та просторі. Проте було проведено багато досліджень з метою розробки моделей, які найкраще відображають умови поширення сигналу в даному середовищі. За визначенням, модель поширення - це математичний вираз, що дає змогу передбачити рівень потужності, отриманий приймачем у певній точці [27].

Для визначення втрат потужності через різні загасання пропонуються різні підходи. Деякі з цих моделей враховують лише частину загасань, наприклад, ослаблення у вільному просторі, але інші, більш витончені, використовують статистичні показники та ймовірні закони. Загалом моделі поширення можна класифікувати на три категорії: детерміновані, емпіричні, напівемпіричні (гібридні).

Детерміновані моделі. Детерміновані моделі або їх також називають «теоретичними моделями» є чисто математичними і спираються на фундаментальні закони фізики для моделювання умов поширення. Вони служать еталонними моделями.

Модель Фріїса: модель поширення Фріїса або «формула Фріїса» розглядає лише пряму хвилю та поширення у вільному просторі за ідеальних умов: простір, позбавлений усіх збурень (без перешкод, без відображення, дифракції чи заломлення). Таким чином, відношення потужності прийому до потужності передачі обернено пропорційне квадрату відстані між передавачем і приймачем Фріїса (1946), Парсонс (1992).

Емпіричні моделі. Емпіричні моделі засновані на експериментальних вимірюваннях, зроблених для різних наборів параметрів, таких як частота, відстань, висота антени. Вони надійні, швидкі та не вимагають баз даних. Дійсно, потужність сигналу, отриманого в точці простору, моделюється комбінаціями математичних виразів і факторів, які встановлюються на основі

спостережень за характеристиками сигналу в розглянутому середовищі. Однак їх точність залежить від подібності між умовами поширення в змодельованому середовищі та умовами середовища, в якому збираються дані моделі [26].

Ці моделі часто є специфічними для середовища, яке вони характеризують (міського, сільського тощо). Як приклад, відомою моделлю є модель Каморхта Аомра, Хата та його варіанти та ін. Ці моделі засновані на статистичному аналізі великої кількості експериментальних вимірювань, проведених в околицях Токіо на різних частотах. Ці моделі часто використовуються в бездротових мережах, розгорнутих у зовнішньому середовищі, включаючи стільникові мережі. Вони дають змогу оцінити пом'якшення з більшою точністю ніж у порівнянні з детермінованими моделями. Новелою в цих моделях є факт введення в розрахунок загасання коригувального члена, який залежить від типу середовища, що залежить від розміру розглянутого середовища (розділені офіси, офіси відкритого простору тощо) та частоти використаного діапазону.

Розробка цих моделей базується на розподілі вимірювань потужності, отриманих на однаковій відстані в заданому середовищі. Цей розподіл дає можливість вибрати закон ймовірності та його параметри для оцінки потужності які змінюється. Однак ці моделі мають області дії, обмежені низкою умов застосування - з точки зору діапазону частот, висоти антени та відстані між двома антенами.

Напівемпіричні моделі. Напівемпіричні моделі або «гібридні моделі» поєднують аналітичне формулювання фізичних явищ (відбиття, пропускання, дифракція, дифузія) і статистичне коригування з використанням експериментальних вимірювань, наприклад, так званої моделі поширення тіні. Вони швидкі, точні та надійні, оскільки покладаються на ці експериментальні вимірювання та використовують методи ймовірнісний для інтегрування випадкового коефіцієнта в розрахунок потужності прийнятого сигналу. Насправді ефекти ослаблення часто розвиваються повільно і випадково, і їх важко контролювати. Це стосується тимчасових перешкод, наприклад, руху

транспортних засобів чи людей тощо. Існує кореляція між результатами розрахунків за теоретичними моделями та експериментальними вимірюваннями потужності прийнятого сигналу, вираженої в дБ або дБм. Фактично, частина загасання змінюється логарифмічно як функція відстані, а інша частина є випадковою величиною, яка відповідає закону логарифмічної норми (через ефект тіні) [28].

2.3. Характеристики проблеми синхронізації тактового сигналу датчика

Ще в 1992 році була виявлена неточність і незручність налаштування часу хоста. На цій основі був запропонований «алгоритм тайм-ауту». У комерційній мережі того часу синхронізація годинника досягалася за допомогою мережевих вузлів. Зокрема, це означає, що в минулому, коли вузол призначення ініціював сигнал синхронізації годинника, він запускав хронометраж, а потім запускав локальний таймер годинника. Якщо він перевищує певний період часу, цей результат не враховується в записі, щоб уникнути помилки, викликані мертвим циклом і примусовим завершенням алгоритму. Це був перший раз у країні, коли деякі вчені досліджували принцип синхронізації годинника та його недоліки. «Алгоритм тайм-ауту» відкрив хід синхронного розвитку вітчизняних годинників. При застосуванні традиційного короткохвильового часу було виявлено, що хоча зона покриття була широкою, але на неї легко впливали природні умови, а синхронізація часу неточна. У 1997 році в пристрої синхронізації годинника була використана глобальна система позиціонування (GPS) навігаційного супутника з визначенням часового діапазону. Застосування поступово збільшується. У 1999 році протокол Network Time Protocol (NTP) і пряма передача часу з'єднання широко використовувалися як два важливих методи синхронізації годинників комп'ютера. Поєднує пряму передачу часу з'єднання з точністю до 1 мкс і протокол NTP з точністю всього 1 мс, це не тільки покращило точність

синхронізації годинника, але й заощадило витрати та підвищило гнучкість використання протоколу NTP [29]. У 2001р. оскільки дослідження синхронізації бездротового датчика ставало все більш поглибленим, вітчизняні вчені більше не розглядають синхронізацію годинника як загальну синхронізацію, а натомість поділяють метод синхронізації розподіленого системного годинника на внутрішню використовувану відносно синхронізацію годинника та абсолютну синхронізацію часу в умовах зовнішнього опорного часу. Крім абсолютної синхронізації в умовах зовнішнього відліку часу, за цієї передумови було запропоновано новий метод спрощення трикутної сітки на основі квадратичних похибок, який не тільки реалізував простий і швидкий метод, але й міг підтримувати високу точність, що викликало дискусію багатьох учених. На початку 21 століття зарубіжні вчені вдосконалили та поєднали традиційні алгоритми синхронізації годинника. У 2005 р. виявилось, що можна використовувати високоточні та недорогі алгоритми синхронізації за рахунок вдосконалення традиційних методів GPS. Цей алгоритм зберіг середні значення низької вартості, дальності та стабільності сигналів GPS, а загальна концепція дизайну GPS була використана для корекції частотно-часового сигналу атомних годинників на наземних станціях. До цього GPS застосовувався в різних галузях, включаючи дослідження цифрових комунікаційних мереж, трафіку, електроенергії, фінансової мережі даних, військових, іоносферних характеристик. Щоб повною мірою розкрити переваги GPS, вітчизняні вчені почали вивчати недорогий і високоточний метод синхронізації годинника в реальному часі GPS, а також досягли деяких досягнень у вирішенні проблеми низької точності синхронізації та низької стабільності, однак, середовище використання GPS було обмежене. Більшість вчених вирішили використовувати протокол NTP для досягнення синхронізації мережевого годинника на основі переваг GPS.

Пізніше з'явився алгоритм, який використовував алгоритм конвергенції для аналізу та оцінки помилок, який був більш інноваційним, оскільки його можна було не тільки викликати програмним забезпеченням клієнта NTP, але

також було легко використовувати в локальній мережі – апаратній системі годинника. Точність могла бути нижче другого рівня, але в той час технологічний розвиток був обмежений тим, що не вдалося реалізувати ефект від тестування клієнтського програмного забезпечення та кількох серверів одночасно. Це також був найбільший недолік протоколу NTP.

З 2010 року бездротові датчики більш знайомі та використовують все більше і більше людей, а синхронізація годинника була глибоко вивчена та використовується в різних аспектах. Поєднуючи синхронізацію годинника з традиційним визначенням дальності, заснованим на різниці часу прибуття (TDOA), був створений новий алгоритм. Результати моделювання показали, що цей алгоритм має кращу надійність і здатність обміну повідомленнями, ніж існуючий класичний алгоритм синхронізації часу. Подолання обмежень традиційного визначення дальності щодо синхронізації годинника, прийняття зворотного мислення та пропонування нових алгоритмів не лише усунули передумову TDOA щодо синхронізації годинника, але й значно покращили надійність, точність синхронізації, тощо [30]. У тому ж році, вчені почали вивчати алгоритми синхронізації такі як: синхронізація еталонного мовлення (RBS), синхронізація годинника вимірювання затримок (DMTS), протокол синхронізації часу сенсорної мережі (TPSN) і мінімальна синхронізація (Tiny-sync), Lightweight Tree Synchronization (LTS) тощо. Вони були вдосконалені та інноваційні, завдяки покращенню точності, надійності, стабільності, накладних витрат тощо, а також зменшення пакетів даних на етапі виявлення рівня через розташування між вузлами. З розвитком науки і техніки апаратне та програмне середовище ставало все більш комплексним, а традиційний метод синхронізації годинника був відомий кожному і застосовувався до всіх аспектів життя. Оскільки точність, ефективність і простота кожного алгоритму були покращені, показник відмовостійкості також став важливим показником. Взявши за приклад метод FTSP, під час використання традиційного методу FTSP було отримано багато повідомлень про помилки, а швидкість дрейфу тактової частоти сильно коливалася. Після поєднання його з коефіцієнтом

допуску помилок, нова швидкість дрейфу була розрахована шляхом зваженого усереднення існуючої швидкості дрейфу тактової частоти в минулому, що призвело до покращення методу FTSP. Ваговий коефіцієнт все ще визначався динамічно за дисперсією попередніх вимірювань і після багатьох експериментів. Було виявлено, що швидкість дрейфу повідомлення про помилку була відносно стабільною [31].

Синхронізація годинника як проблема, яку необхідно вирішити в бездротових сенсорних мережах, привернула увагу вчених в країні та за кордоном. Нині в мережі Інтернет схема синхронізації годинника слідує за мережею NTP, і вона налаштовує годинник відповідно до затримки та різниці в часі між одним циклом і наступним циклом, щоб досягти мети узгодженості часу двох маршрутизаторів. Мережевий протокол NTP вимагає двостороннього зв'язку, щоб усунути затримки в передачі інформації для досягнення синхронізації годинника. Однак у сучасних сенсорних мережах важче реалізувати двонаправлену симетрію зв'язку.

Умовно кажучи, система глобального позиціонування супутникової навігації часу польоту більш здатна зустрічати вузли датчиків з обмеженими можливостями та розрахунками, тому GPS є найпоширенішим засобом для синхронізації годинника. Однак GPS є дорогим і вимагає високих екологічних вимог. Його необхідно використовувати в безперешкодному середовищі. GPS спочатку був винайдений Сполученими Штатами для задоволення військових потреб. Космос складається з кількох супутників GPS, кожен з яких оснащений атомними годинниками з гелієм і неодимом, які періодично калібруються станцією моніторингу. Пристрої, що приймають GPS, зазвичай отримують сигнали від чотирьох або більше супутників. Вони можуть не тільки виміряти положення на землі, але також можуть відстежувати розрив між ними та світовим часом, а потім відкалібрувати його. Через особливу природу бездротових сенсорних мереж їх передача має несвоєчасні затримки, суворі вимоги та надійність. Таким чином, NTP і GPS не можна безпосередньо використовувати для синхронізації годинника бездротового датчика мережі.

Існує дві причини несинхронізованого бездротового датчика: детермінована та недетермінована. Детермінована помилка включає багато аспектів. Проте в результаті експериментів було виявлено, що вплив швидкості дрейфу та відхилення на синхронізацію годинника є найбільшим [32].

Визначення являє собою швидкість дрейфу годинника вузла, тобто швидкість зміни часу спостереження і фактичного часу, коли сигнал досягає вузла I , θ представляє відхилення годинника вузла, тобто різницю в часі між часом спостереження і фактичний час одночасно.

2.4. Синхронізація годинника RBS та його вдосконалення

RBS є найбільш часто використовуваним методом синхронізації годинника в розподілених датчиках. Метод лінійного дрейфу використовується для обчислення дрейфу тактової частоти між двома вузлами. Тактовий кварцевий генератор використовується для налаштування часу, щоб значення дрейфу було близьким до нуля, що забезпечує більш точну синхронізацію годинника. Специфічною операцією є те, що без впливу на нормальне коливання експеримент використовує метод вимірювання частоти безпосередньо від кварцевого генератора для вимірювання періоду переривання, і шляхом безперервного регулювання отримується точний період переривання, а потім справжня частота.

Частота визначається як перша похідна тактового сигналу і використовується для представлення частоти тактування. Частота ідеального годинника завжди дорівнює 1, а кристалічна частота фактичного годинника буде коливатися в залежності від змін зовнішніх факторів навколишнього середовища, таких як температура, вологість, тиск, напруга живлення та електромагнітні перешкоди.

Враховуючи постійну температуру, навантаження на джерело живлення та незначну стабільність, можна отримати точну частоту кристала, і

проводяться численні експерименти для компенсації кварцевого генератора, так що дрейф між вузлами прагне до нуля. У той же час, згідно з локальною міткою часу між двома вузлами, обчислюється середнє відносний зсув, і локальний годинник одного з вузлів коригується як стандарт, так що зсув наближається до нуля.

Опорний вузол одночасно надсилає повідомлення до вузлів a і b для запису стандартного годинника. У той же час вузол b надсилає повідомлення до вузла a , а потім синхронізує годинник вузла a з вузлом b . Щоб перевірити, чи досягнуто реальної синхронізації годинника, вузол a знову надсилає повідомлення про синхронізацію вузлу b , що геніально виключає відправку. Вплив годинника на синхронізацію годинника забезпечує досягнення справжньої синхронізації годинника [33].

Удосконалення методу RBS. Похибка даних через використання методу RBS більша. За останні роки в метод RBS було внесено багато вдосконалень. Наприклад, метод RBS у поєднанні з методом найменших квадратів полягає у використанні методу найменших квадратів для визначення точки сингулярності та ефективного видалення сингулярності, що вказує на вибірку, яка чутлива до точки сингулярності через помилку/помилки або точки вибірки які не потрапляють в межі обсягу експериментального проєкту. Він може ефективно ідентифікувати та видаляти особливі точки, уникати існування великої кількості сингулярностей та впливати на справжній розподіл експериментальних даних. Завдяки традиційному методу найменших квадратів легко спричинити надто повільну швидкість збіжності синхронізації годинника.

Метод синхронізації RBS має вимогу, щоб локальний годинник вузла синхронізації підлягав компенсації дрейфу та зсуву. Метод найменших квадратів використовує метод лінійної операції підбору для виконання операції підгонки на вибіркового набору моменту часу, щоб отримати локальний годинник вузла щодо еталонного.

Швидкість дрейфу тактового сигналу вузла та значення зсуву тактового сигналу. Метод найменших квадратів має переваги невеликого розміру даних, але окремі особливості мають великий вплив на результати обчислень. У процесі експерименту немає гарантії, що немає сингулярності. Тому для розрахунку годинника пропонується вдосконалений метод найменших квадратів. Дрейф і відхилення для підвищення швидкості синхронізації годинника. Конкретні методи такі:

- спочатку імпортуються дані, розраховується різниця даних між точкою та наступною точкою вибірки;
- потім необхідно визначити, чи є ця різниця позитивною. Якщо він негативний, дані є особливою точкою, і точка сингулярності буде знову видалена [1].

Якщо це додатне число, для обчислення скористайтеся методом найменших квадратів. Це мережеве середовище є синхронним годинником алгоритму RBS. Метод RBS є незворотним під час запущеного процесу. Тому поєднання методу найменших квадратів і алгоритму RBS є вигідним для видалення точок сингулярності і може дійсно відображати реальну ситуацію вибіркового даних.

Метод DMTS та його вдосконалення. Огляд методу Метод. DMTS, заснований на вимірюванні затримки, стає найпопулярнішим методом синхронізації годинника протягом тривалого часу через його простий принцип, низьку складність та економію енергії. DMTS – це метод однонаправленої синхронізації годинника, заснований на моделі відправника. Щоб уникнути затримки обробки відправляючого вузла та затримки доступу до рівня MAC, вузол-відправник додає мітку часу t_0 до ширококомовного пакету. Припустимо, що довжина надісланого повідомлення дорівнює бітам NA , а витрата часу кожного біта дорівнює t , одержувач записує місцевий час t_1 після отримання синхронізації та записує час t_2 перед налаштуванням власного запису місцевого годинника. У цей час, щоб досягти синхронізації годинника з відправним вузлом, одержувач може налаштувати час одержувального вузла.

Оптимізація методу. Оскільки метод DTMS ставить під загрозу споживання енергії та точність синхронізації, точність синхронізації слабка, і він підходить лише для бездротових сенсорних мереж з менш точними вимогами. Тому вчені в суміжних галузях використовували метод DMTS і метод TPSN в останні роки. Поєднуючи переваги обох і оптимізуючи традиційний метод DMTS [34].

У цьому методі є дві частини шляху. Головний шлях - це шлях, що складається з трьох вузлів маршрутизації А, В і С. Допоміжний шлях складається з вузла В і двох сенсорних вузлів D і E. Підмережа 1 і підмережа 2, що складається з вузла С і двох сенсорних вузлів F і G. Цей покращений метод DTMS використовує метод TPSN для основного шляху маршрутизатора і використовує метод DMTS для вторинного шляху. Це робить алгоритм простішим, точність значно покращується, а споживання мережі значно зменшується.

Конкретний метод реалізації полягає в тому, що на первинному шляху вузол А спочатку надсилає команду, щоб вказати вузол В як його наступний вузол синхронізації стрибків. Номер вузла А дорівнює 0, і ідентифікатор вузла А записується та надсилається до вузла В. Коли вузол В отримує сигнал від вузла А, він записує свій власний номер шару як 1, а ідентифікатор батьківського вузла є А, і налаштує свій власний годинник і синхронізацію годинника вузла А, і так далі. Вузол В відправить груповий пакет до вузла С і зробить вузол С наступним вузлом синхронізації стрибків, вузол С отримає сигнал, запише їх власну ієрархію № 2 і синхронізацію годинника з вузлом А.

На вторинному шляху точність методу нижча, тому немає серйозних обмежень на період, і для синхронізації можна вибрати більш тривалі періоди, щоб зменшити споживання мережі. У підмережі, утвореній вузлом маршрутизатора В, вузлами датчиків D і E, вузли наступного переходу, позначені вузлом В, є вузлами D і E. Після отримання сигналів вузли D і E змінюють свій власний місцевий час. При синхронізації з В підмережа,

утворена вузлом маршрутизатора С, F і G, також використовує той самий метод для досягнення синхронізації часу.

Метод парної синхронізації. Теорія Байєса в поєднанні з методом оптимізації TPSN. Пропонувач TPSN реалізує механізми TP_sN і RBs на платформі Berkeley Mica. Для пари вузлів Mica з тактовою частотою 4 МГц середня помилка часової синхронізації TPSN становить 16,9 мікросекунд, тоді як RBS становить 29,13 мікросекунд [35]. Метод TPSN і традиційний протокол NTP використовують два рукостискання для обміну мітками часу для досягнення синхронізації годинника. У порівнянні з методом RBS, метод TPSN має більшу різницю в точності.

Є два вузли: вузол А, який підлягає синхронізації, і опорний вузол В. Вузол А, який потрібно синхронізувати, надсилає запит синхронізації до опорного вузла В і записує локальний годинник T_1 . Вузол В записує місцевий час T_2 після отримання запиту. Після певного періоду часу, синхронна відповідь буде надіслана посилаючому, а годинник T_3 (в той момент часу) буде записаний. Записані та передані дані T_2 і T_3 передаються до вузла А, який підлягає синхронізації. Вузол А отримує повідомлення-відповідь і записує час T_4 .

Оптимізація методу. Метод TPSN записує часові позначки для надсилання та отримання сигналів комп'ютера. У цьому методі помилка синхронізації будь-якого вузла залежить від кількості переходів від кореневого вузла і не має відношення до загальної кількості вузлів, тому метод TPSN можна використовувати для великих мереж. Цей метод має хорошу масштабованість, але коли довжина шляху зростає, помилки, викликані нестабільністю тактової частоти та затримками в обміні інформацією між синхронними вузлами, будуть збиратися і значною мірою впливати на точність алгоритму. Тому нещодавно ми об'єднали байєсівську оцінку з методом TPSN, щоб зменшити помилку синхронізації за допомогою байєсівської оцінки та оптимізувати метод TPSN.

Байєсова оцінка - це метод, який приймає невідомий параметр α як випадкову величину відомого розподілу $\pi(\alpha)$, тим самим математично розставляючи пріоритети та використовуючи попередню інформацію. Вона буде називатися попередньою ймовірністю, враховуючи відомий вибірковий простір D [36].

Апостеріорна ймовірність було розраховано з байєсівської оцінки та функцій ймовірності, на основі попередньої ймовірності передумови додаються, а ймовірність того, що поправка буде пройдена після отримання нової умови, є результатом, ближчим до реальної ситуації.

У методі TPSN синхронізація вузлів досягається шляхом прогресивного обміну повідомленнями, що неминуче призводить до затримок поширення. Тому також генеруються помилки синхронізації. У мережах з кількома переходами помилки синхронізації більші, а метод TPSN у поєднанні з байєсівською оцінкою може зменшити затримки передачі при обміні повідомленнями, покращити точність синхронізації часу.

Загалом помилки поділяють на два типи: детерміновані та недетерміновані. Детермінована помилка відноситься до швидкості дрейфу тактового сигналу і відхилення тактового сигналу. Лінійний нахил відноситься до швидкості дрейфу годинника. Перетин прямої лінії на ординаті представляє перекіс годинника двох вузлів. А недетермінована частина викликана затримкою доставки повідомлення. Його можна розглядати як нормальний розподіл із середнім значенням 0. Алгоритм оптимізації, який потрібно вирішити, полягає в тому, щоб поступово зменшувати помилку, викликану затримкою доставки повідомлення, щоб підвищити точність синхронізації.

Покращений метод дрібної синхронізації. Метод Tiny-sync є поширеним для огляду методів синхронізації годинника.

У методі вузол j надсилає повідомлення іншому вузлу i . Час відправлення повідомлення дорівнює T_1 , а потім вузол i записує свій власний годинник T_2 . У цей час повідомлення, надіслане вузлом j , приймається, повертається повідомлення i , вузол j приймає та отримує вузол i .

Метод Tiny-sync заснований на цих трьох точках часу, щоб обмежити значення, алгоритм може продовжувати отримувати точки даних шляхом обміну повідомленнями, щоб підвищити точність алгоритму [37].

Оптимізація методу. Щоб запобігти випадковому видаленню корисних даних методом Tiny-sync, метод Mini-sync був узагальнений, а принцип методу Mini-sync узгоджується з методом Tiny-sync. Стандарт був забезпечений лише на основі оригінального дизайну. Дані, видалені методом Tiny-sync, точно не потрібні. Через велику кількість точок даних ці два методи мають такі переваги перед іншими алгоритмами синхронізації часу: високу точність, високу відмовостійкість і високий ступінь використання, але метод міні-синхронізації має тривалий час збіжності та великі витрати. Вони не підходять для багатьох випадків. Щоб перевірити, чи є дані шуму в методі Tiny-sync, ми провели багато імітаційних експериментів. У імітаційному експерименті використовуються дані. Результати експерименту показують, що зі збільшенням вибіркового даних частота помилок поступово збільшується. Коли вибіркові дані досягають 1500, рівень помилок досягає 100%. Тому використання методу Tiny-sync також обмежене середовищем. Оскільки в методі Tiny-sync існує велика зміна діапазону даних, які будуть використані, зростає частота помилок і генеруються шумові дані. У величезних даних кожна інформація має шумові дані, і це матиме великий вплив на кінцевий результат. Вчені найближчим часом інтегрували метод підгонки кривих і запропонували вдосконалений метод.

Цей покращений метод Tiny-sync в основному призначений для зниження частоти помилок у середовищі з шумом даних, тому пропонується метод ITS, на який не впливає шумове середовище даних. Використовуючи ті самі дані для симуляційного аналізу, дані показують, що незалежно від того, як змінюється обсяг даних, рівень помилок методу ITS дорівнює нулю, вибірка даних становить від 200÷1500 або навіть вище, а рівень помилок залишається нульовим. В основному це пов'язано з даними, які розглядаються методом

ITS. Як загальна тенденція, вплив окремих точок даних на результати було зведено до мінімуму.

Використовуючи дані для порівняння точності двох алгоритмів, коли кількість даних менше 1000, крива, що представляє метод ITS, коливається навколо кривої методу Tiny-sync і узгоджується з точністю методу Tiny-sync. Коли обсяг даних перевищує 1000, крива методу ITS наближається до осі X, а іноді ордината кривої точності методу дорівнює нулю. Отже, можна зробити висновок, що точність методу ITS і методу Tiny-sync в основному є постійною [38].

Метод LTS. Огляд методу. У бездротових сенсорних мережах LTS є більш консервативним методом синхронізації годинника. Це метод синхронізації бездротового датчика, який економить енергію, жертвуючи точністю, а також є відносно простим методом. Метод LTS в основному використовується для глобальної синхронізації годинника і заснований на двонаправленій парній синхронізації. Він пропонує розподілений алгоритм синхронізації та централізований метод синхронізації. Тому метод LTS більше підходить для середовищ, де точність знаходиться в межах заданої точності, а складність невелика.

Метод LTS ділиться на дві частини. Перша частина – це метод централізованої синхронізації. Метод централізованої синхронізації потребує побудови поясного дерева. По-перше, синхронізація за один стрибок виконується вздовж краю основного дерева. Існує лінійна залежність між кількістю парних синхронізацій і кількістю ребер. По-друге корінь опорного дерева служить орієнтиром, і іноді знову потрібна синхронізація. На час прийому, передачі та синхронізації всієї синхронної мережі впливає глибина поясного дерева. Таким чином, не можна пропустити будь-яку інформацію обтяженого дерева. Цю інформацію слід проаналізувати та використати.

Друга частина - метод розподіленої синхронізації. У методі розподіленої синхронізації синхронізація годинника визначається кожним вузлом. Охоплююче дерево використовується лише в методі централізованої

синхронізації. Коли один із вузлів потрібно синхронізувати, він надсилає повідомлення синхронізації до найближчого опорного вузла. Усі вузли між вузлами, які підлягають синхронізації, повинні завершити синхронізацію годинника до того, як вузли будуть синхронізовані.

Найбільша перевага методу LTS полягає в тому, що він економить мережеві витрати, може значною мірою заощадити мережеві ресурси та уникнути споживання мережевих ресурсів, викликаного зв'язком з іншими вузлами верхнього рівня. Однак метод LTS має загальну точність і може використовуватися лише для вимог точності.

2.5. Порівняння продуктивності різних методів синхронізації часу

Методи синхронізації годинника п'яти вищеназваних видів бездротових датчиків охоплюють застосування оптимізації відносно базового методу синхронізації годинника на даний момент, і деякі існуючі методи оптимізації тактової синхронізації також засновані на цьому вдосконаленні. До бездротових сенсорних мереж пред'являється багато вимог, і різні програми мають різні характеристики. Щоб задовольнити ці вимоги, ми повинні порівняти різні методи та зрозуміти їх переваги та недоліки.

Покращений метод RBS має кращу обробку особливих точок, ніж традиційні методи RBS. Традиційний метод RBS має високу точність, але має меншу потужність обробки для непарних точок. Він схильний до таких помилок: помилки точності через різницю частоти кристалів, похибки точності через відхилення даних на приймальному вузлі, пакети маяків поширюються в середовищі. Удосконалений метод RBS покращує швидкість збіжності методу на основі видалення особливих точок. Це робить метод більш точним, надійнішим і стійким до відмов, ніж інші вдосконалені методи. Тому вдосконалений метод RBS можна використовувати в середовищах з високими вимогами до точності.

Метод TPSN має високу точність і не слабшає зі збільшенням кількості вузлів. Однак у міру збільшення довжини шляху та кількості стрибків тактова частота стає нестабільною, і додається помилка, викликана затримкою між інформацією кожної пари синхронних вузлів. Це матиме значний вплив на точність синхронізації годинника. Відповідно до цієї передумови, у поєднанні з байєсівською оцінкою, проблема нестабільної точності може бути вирішена шляхом зменшення затримки обміну повідомленнями, але проблема збою кореневого вузла все ще не вирішена. Таким чином, відмовостійкість, як правило, застосовна до недорогих і низькоточних бездротових сенсорних мереж [39].

Складність алгоритму, утвореного поєднанням методу DMTS з нижчою точністю алгоритму та більш точним методом TPSN, стає меншою. Точність алгоритму нижча, ніж у методу TPSN, але споживання енергії значно зменшується. Конструкція поділяється на основні та підшляхи, розподіл праці чіткий, структура проста, а міцність відносно висока. Загалом, поєднання цих двох є доповненням один одного. Він застосовний до малих і середніх бездротових сенсорних мереж з низькими вимогами до точності, і може використовуватися в таких системах, як контроль доступу та облік робочого часу.

Метод Tiny-sync широко використовується як один із класичних методів синхронізації бездротового датчика. Але через його власний алгоритм здатність обробки шумових даних погана, тому впливу шумових даних неможливо уникнути. Через низьке споживання енергії та низьку точність покращений метод Tiny-sync робить особливий акцент на даних шуму. Він дуже ефективно пом'якшує обробку даних шуму та ефективно усуває шумові дані, тим самим зменшуючи вплив даних шуму на точність алгоритму. Однак точність покращеного методу Tinysync все ще дуже низька. Використовуючи дані роботи, після кількох імітаційних експериментів можна зробити висновок, що затримка від одного вузла до іншого має бути не менше 3,08 мс, затримка в обидва боки – 25,217 мс, а затримка передачі зонда повідомлення

та повернення підкоряється середньому 3,536. Зі стандартним відхиленням 1,312 мс точність та енергоспоживання нижчі, ніж у інших методів, і несправність кореневого вузла не може бути налаштована. Тому він підходить для малих і середніх бездротових сенсорних мереж, які потребують низької точності та високого споживання енергії [40].

Метод LTS поділяється на два методи: централізований метод і розподілений метод. Централізований метод схожий на метод TPSN. Охоплююче дерево впливає на точність алгоритму. У розподіленому методі потрібна лише синхронізація з батьківським вузлом, що значно заощаджує мережеві витрати, економить мережеві ресурси та уникає марнотратства ресурсів, спричиненого надто складними мережевими процесами. Середня складність зведена до мінімуму, але це також призводить до менш точних методів. У порівнянні з іншими вдосконаленими методами, кожна продуктивність є низькою, що підходить для малих і середніх бездротових сенсорних мереж з низькими вимогами до точності, низької складності та високого споживання енергії.

Для порівняння можна побачити, що TPSN LTS і TS використовують такі алгоритми, як S, щоб побудувати ієрархічне дерево з використанням ширококомовної передачі, а потім використовують двонаправлену модель обміну повідомленнями для синхронізації часу між верхнім і нижнім вузлами.

TPSN використовує метод відмітки часу на рівні MAC для досягнення точності синхронізації часу 16,9 мікросекунд. Тому при розробці алгоритму рівень MAC можна використовувати для позначення часової позначки для підвищення точності синхронізації. Алгоритм RBS має хорошу точність синхронізації на коротких відстанях з одним стрибком, але він не підходить для синхронізації з кількома стрибками. Для мереж кластеризації цей метод можна розглядати як синхронізацію внутрішньокластерних вузлів». Алгоритм TSync використовує двоканальний метод, який поєднує трансляцію, механізм синхронізації і алгоритм двонаправленого обміну повідомленнями, а накладні витрати на зв'язок невеликі. Але він припускає, що кожен вузол знає свій

основний ідентифікаційний номер сусіднього вузла, що є проблемою, яку необхідно вирішити під час фактичної синхронізації [41].

Для деяких застосувань які не вимагають високої точності, але вимагають низької обчислювальної складності, розгляньте можливість використання DMTS. Алгоритм відповідно до різних прикладних середовищ, він також може використовувати комбінацію методів для синхронізації мережі. За різноманітними критеріями жоден алгоритм не є оптимальним. Для різних вимог додатків, можна з безлічі компромісів вибрати більш оптимальний алгоритм. Для різних цілей проектування підходять різні алгоритми, які мають кращі, ніж інші умови. З різних алгоритмів можна брати краще, щоб розробити кращий алгоритм синхронізації.

Резюме існуючих теорій і методів може закласти хорошу основу для проведення відповідних досліджень. Немає конкретних описів деталей реалізації різних існуючих алгоритмів синхронізації часу бездротової сенсорної мережі. Замість цього процес синхронізації часу розділений на три модулі: «мітка місцевого часу», «синхронний обмін повідомленнями» та «оцінка еталонного часу». Пов'язані з ними теоретичні моделі та методики синхронізації. У реальному розробці алгоритму, відповідно до конкретної ситуації бездротової сенсорної мережі та вимог користувача до синхронізації, слід гнучко використовувати та розширювати існуючі теорії та технології синхронізації, а також розробляти ефективний алгоритм синхронізації часу.

Завдяки аналізу та дослідженням покращених методів вищезгаданих кількох типових методів було виявлено, що кожен метод синхронізації годинника має свої переваги та недоліки у випадку різних прикладних середовищ або додатків, а покращений метод покращується на основі оригінальних традиційних методів. Слабкі сторони можуть бути ослаблені, а переваги – більш помітними. Розвиток бездротової сенсорної мережевої синхронізації годинника був відносно зрілим від незрілого до сьогодні. Постійне дослідження протоколів синхронізації годинника, що

застосовуються в конкретних середовищах, є результатом постійного навчання та інновацій [11].

Дослідження технології синхронізації в майбутній бездротовій сенсорній мережі є більш комплексним процесом. Поки що не існує більш всеосяжного та повного методу бездротового датчика, який вимагає від кожного алгоритму вчитися один у одного за допомогою взаємної інтеграції для створення нового, більш всеосяжного методу. Слід повною мірою використовувати технологію злиття даних з різних сторін для вивчення програми оптимізації методу синхронізації годинника, наприклад, поєднання методу максимальної правдоподібності, методів опуклої оптимізації для підвищення точності алгоритму, ієрархічних операцій для досягнення економії коштів. Для апаратного забезпечення великомасштабне обладнання все ще не є ідеальним. Це залежить від передових технологій і потужної апаратної платформи. Зараз вітчизняні та зарубіжні вчені мають менше досліджень з цього матеріалу, тому вони потребують постійного вдосконалення та інновацій. Це також стане дослідницькими точками майбутніх бездротових сенсорних мереж.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Механізм синхронізації за допомогою розробленої програми

Відповідно до нашої концепції, керованої додатком, синхронізація досягається між вузлами, які запускають однакові програми, або між вузлами, які мають однаковий робочий цикл програми, з урахуванням їх робочих циклів. Таким чином, коли вузол вперше приєднується до мережі, він очікує пакет запиту програми, щоб налаштувати свій віртуальний годинник на час, що передається пакетом запиту. Ми розуміємо, що це відповідає встановленому для вузлів значенню часу, яке не враховує затримки мережі, але, як показано, це не впливає на наш механізм синхронізації, оскільки вузли динамічно коригують свій зсув часу ($\beta \cdot |\delta_{k,n}|$ компонент у Рівнянні 2) і прокидатються і сплять майже в один і той же час протягом усього терміну служби мережі. Таким чином, алгоритм синхронізації використовує переваги пакетів запитів додатків, які надсилаються вузлами-приймачами один раз у кожному робочому циклі програми, щоб підтримувати синхронізацію сенсорних вузлів. Мережа може підтримувати кілька додатків, але лише вузли, на яких запущена одна програма або мають однаковий робочий цикл, будуть синхронізуватися між ними. Таким чином, мережа, яка підтримує різні програми, може мати різні набори вузлів з різною синхронізацією і при цьому залишатися повністю функціональною. Без необхідності надсилати або отримувати пакети іншого типу для цілей синхронізації, вузли будуть покладатися лише на отримані запити для синхронізації. Насправді цей алгоритм централізований на вузлі-приймачі, але його конструкція проста і адекватна для наших цілей [42].

Малоймовірно, що всі сенсорні вузли приєднуються до мережі одночасно. Постійна активність вузлів призведе до виснаження їх батареї, тому вузли повинні лягати спати і періодично прокидатися. Усі вузли повинні бути активними майже в один і той же час, щоб отримувати запити та

пересилати їх іншим вузлам. В результаті вузли повинні бути синхронізовані відповідно до циклу застосування, який вони запускають. Щоб синхронізувати всі вузли в мережі, запропонований нами механізм синхронізації використовує синхронний метод, який включає дві фази: фазу налаштування синхронізації та фазу підтримки синхронізації, описані нижче. Також ми змодельємо сенсорну мережу [43].

3.2. Фаза налаштування синхронізації бездротової сенсорної мережі

Коли сенсорний вузол приєднується до мережі, він залишається в активному стані і чекає на отримання свого першого пакета запиту, надісланого вузлом-приймачем і пересланого іншими вузлами. Після отримання вузол налаштовує віртуальний годинник відповідно до мітки часу, яку передає запит. Як можна помітити з Рис. 3.1., пакет запиту, надісланий вузлом датчика n до сенсорного вузла $n+1$, є тим самим пакетом запиту, що й вузол n отриманого від вузла приймача. Часова позначка, яку передає запит, витягується з пакета запиту [44].

Ця фаза використовується для переналаштування віртуального годинника. Періодичність цього переналаштування залежить від того, як часто вузли повинні переналаштовувати свій віртуальний годинник. Відомо, що ця фаза відповідає встановленню вузлів часу на значення, яке не враховує затримки мережі.

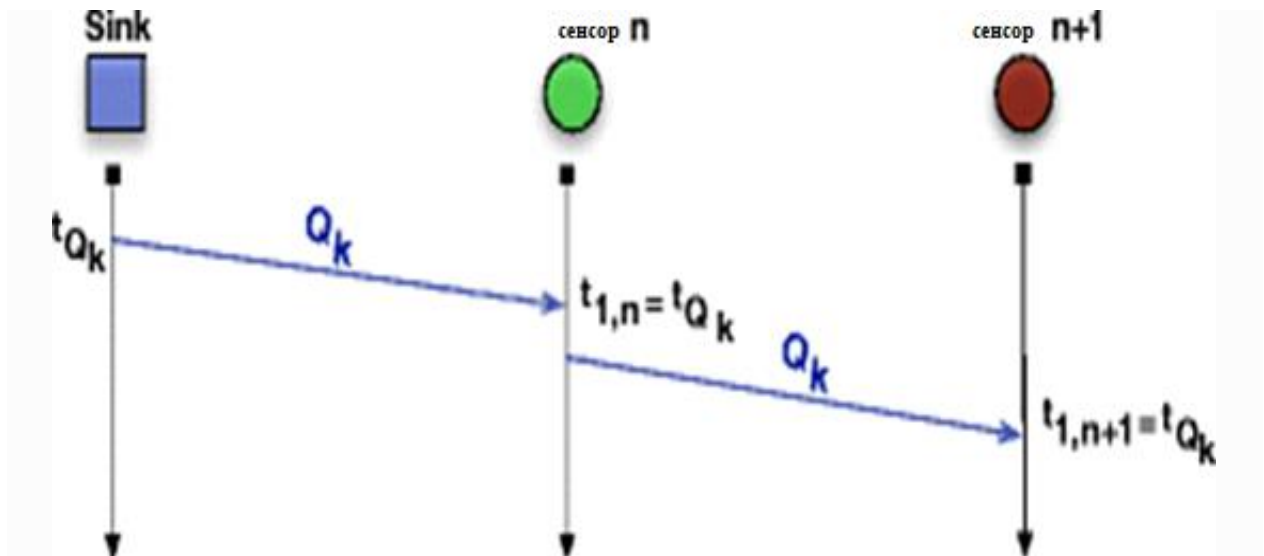


Рис. 3.1. – Фаза налаштування синхронізації

На Рис. 3.2., вузол А дає запит перед вузлом В. Пакет запиту поширюється через мережу, як очікується, з використанням *RPL-BMARQ* рішення про маршрутизації. Сенсорні вузли С і D, які запускають додаток цього приймача, встановлюють свій віртуальний годинник на мітку часу, яку виконує пакет. Вузол датчика Е, який не запускає цю програму, також встановлює свій віртуальний годинник на мітку часу, яку виконує пакет запиту, оскільки це перший запит, який він отримує. Той самий пакет запиту ($Q_{k,j}$) потім пересилається до інших вузлів датчиків (вузлів G, H і K), які також встановлять свій віртуальний годинник на ту саму позначку часу. Сенсорний вузол Е не буде пересилати пакет запиту $Q_{k,j}$, оскільки він не запускає цю програму і не має сусідів, які запускають її. Аналогічно вузол F після отримання першого пакету запиту ($Q_{k,i}$) від вузла-приймача В і оскільки він запускає ту саму програму, налаштовує свій віртуальний годинник на час, що виконується пакетом запиту-приймача В. Оскільки цей приймач вже налаштував свій віртуальний годинник за допомогою часової позначки приймача А, вузол датчика F матиме той самий час, що й інші вузли. Знову запит $Q_{k,i}$ буде перенаправлено до інших вузлів датчиків (вузлів I, J і L), які виконуватимуть те саме налаштування віртуального годинника [45]. На наші моделі показано ті самі налаштування віртуального годинника, але в цьому

випадку саме вузол-приймач В видає перший пакет запиту і налаштовує всі віртуальні годинники мережевого вузла.

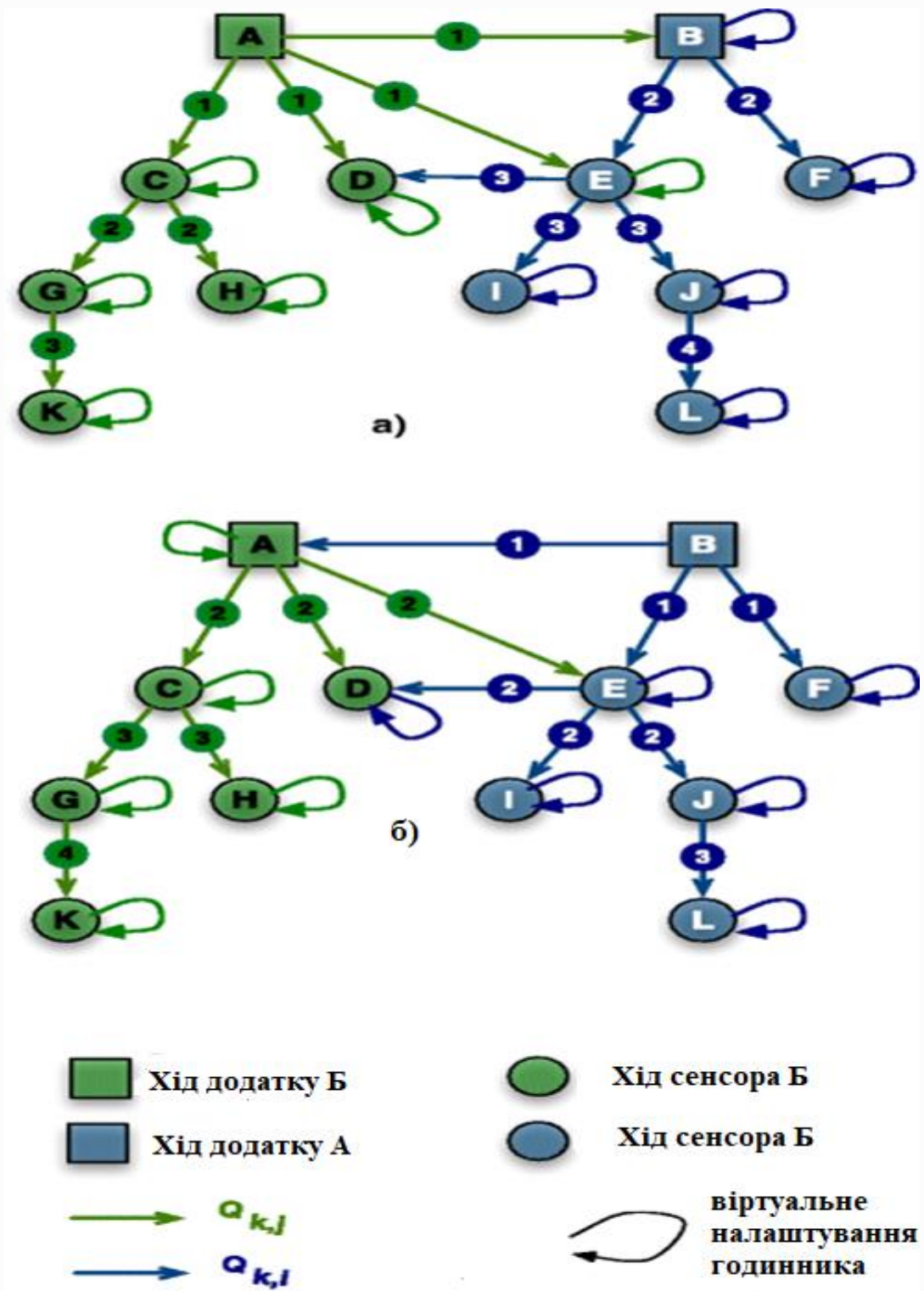


Рис. 3.2. – Модель сенсорної бездротової мережі

3.3. Фаза підтримки синхронізації бездротової сенсорної мережі

Оскільки всі вузли знають характеристики програм, які вони запускають, після отримання першого пакету запиту вони очікують отримати другий пакет запиту за час, коли вузли перебувають у сплячому режимі (T_{OFF}), визначається як $T_{Cycle} - T_{ON}$, де T_{Cycle} — час робочого циклу програми, а T_{ON} — час, коли вузли пробуджуються протягом кожного робочого циклу (Рис. 3.3.). Однак, оскільки мережеві затримки є змінними, вузли отримують цей другий пакет запиту з похибкою.

$$\delta'_{k.n} = (1 - \alpha) \cdot \delta_{k-1.n} + \alpha \cdot (t'_{k.n} - t_k) \quad (1)$$

де:

- $\delta'_{k.n}$ — похибка отримання k-го відправлення, n-го вузла;
- α — вага, надана останньому зразку в розрахунку δ ;
- $\delta_{k-1.n}$ — похибка отримання k-1 -го відправлення, n-го вузла;
- t_k — час відправлення 1-го пакета запиту;
- $t'_{k.n}$ — час відправлення k-го запиту, для n-го вузла.

$$T_{sleep\ k.n} = app.T_{OFF} - \beta \cdot \delta'_{k.n} \quad (2)$$

де:

- $T_{sleep\ k.n}$ — фактичний час, коли вузли повинні перебувати у сплячому режимі;
- T_{OFF} — час, коли вузли повинні перебувати у сплячому режимі;
- $\beta \cdot \delta'_{k.n}$ — динамічна корекція зсуву сну вузла;
- β — коефіцієнт посилення;
- $\delta'_{k.n}$ — похибка отримання k-го відправлення, n-го вузла.

Від'ємне значення означає, що запит було отримано із затримкою, а позитивне значення означає, що запит було отримано заздалегідь. Більше того, затримки є сумою всіх затримок на стрибок для кожного прийому пакету запиту датчика і характеризуються сумою затримок обробки та черги в проміжних і кінцевих сенсорних вузлах, а також затримок передачі та затримок поширення в проміжних вузлах.

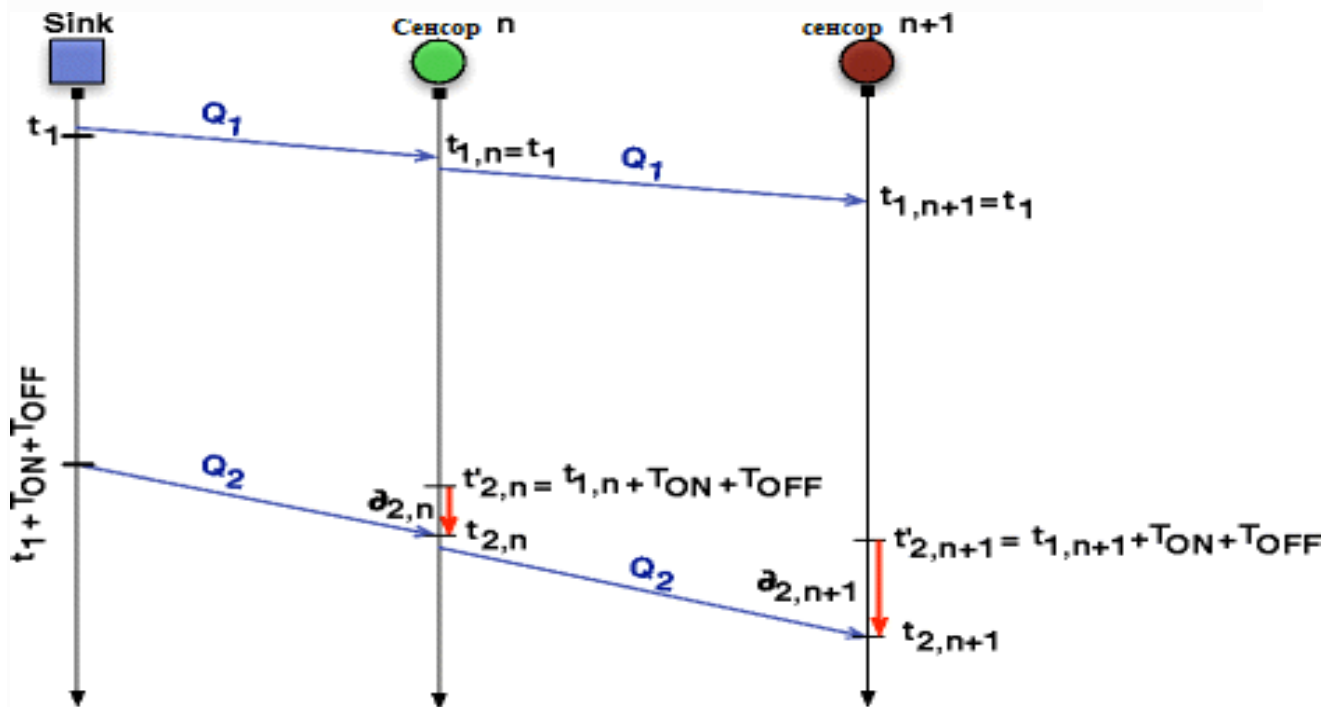


Рис. 3.3. – Фаза підтримки синхронізації в розроблені моделі

3.4. Розроблення програми

```

foreach (app. queryk received ) do
 $\alpha = 0.125$ 
 $\beta = 10$ 
if= (first app.query)) then
set clock (query >  $T_{tx}$ ;
adjust_pereodicity_time = 3600 *24 (eg 24 hours)
adjust_counter =  $\frac{\text{adjust\_pereodicity\_time}}{T\ cycle}$ 
else
if (app.query_id == node.app_id) then
-  $t'_{k.n} = t_{k-1.n} + T_{ON} + T_{OFF}$ 
-  $t'_{k.n} = \text{node. query } T_{RX}$ 
-  $\delta'_{k.n} = (1 - \alpha) \cdot \delta_{k-1.n} + \alpha \cdot (t'_{k.n} - t_k)$ ;
-  $T_{sleep\ k.n} = \text{app. } T_{OFF} - \beta \cdot \delta'_{k.n}$ ;
adjust_sleep timer  $T_{sleepk.n}$ 
adjust_counter = adjust_counter -1
end
if (adjust_counter ==0) then
set clock (query -  $T_{tx}$ );
adjust_counter  $\frac{\text{adjust\_pereodicity\_time}}{T\ cycle}$ 
end
end
end

```

3.5. Оцінка функціонування

Щоб перевірити цю модель сенсорної мережі, спочатку ми представляємо дослідження того, як вузли можуть підтримувати свою синхронізацію, оцінюючи параметри, представлені в рівняннях. Ми також представляємо та обговорюємо результати запропонованого механізму синхронізації з використанням різних значень для параметрів α і β , а також коефіцієнта успішності запиту (QSR) результатів моделювання, і, нарешті, представляємо та обговорюємо деякі результати, отримані з двох реальних тестових стендів. Показник QSR визначається як співвідношення між кількістю пакетів-відповідей, отриманих вузлом-приймачем у відповідь на пакет запиту, і кількістю відповідей, які очікує отримати приймач.

Базове моделювання механізму синхронізації. Механізм синхронізації вузлів оцінювався з урахуванням наступного імовірнісного розподілу затримок мережі: 1) рівномірний розподіл, 2) розподіл по Гауссу та 3) експоненційний розподіл [46].

На Рис. 3.4. в нашій моделі показано один вузол приймача і три вузли сенсорів. Вузол-приймач регулярно передає запити. На прийом кожного запиту впливають різні затримки мережі, і сенсорні вузли після їх отримання коригують свій час сну, щоб спробувати прокинутися в той самий час під час наступного робочого циклу розробленої програми. Для кожного вузла враховувалися різні середні затримки:

- вузол датчика 1, 0,5 с;
- сенсорний вузол 2, 1 с;
- і сенсорний вузол 3, 2 с.

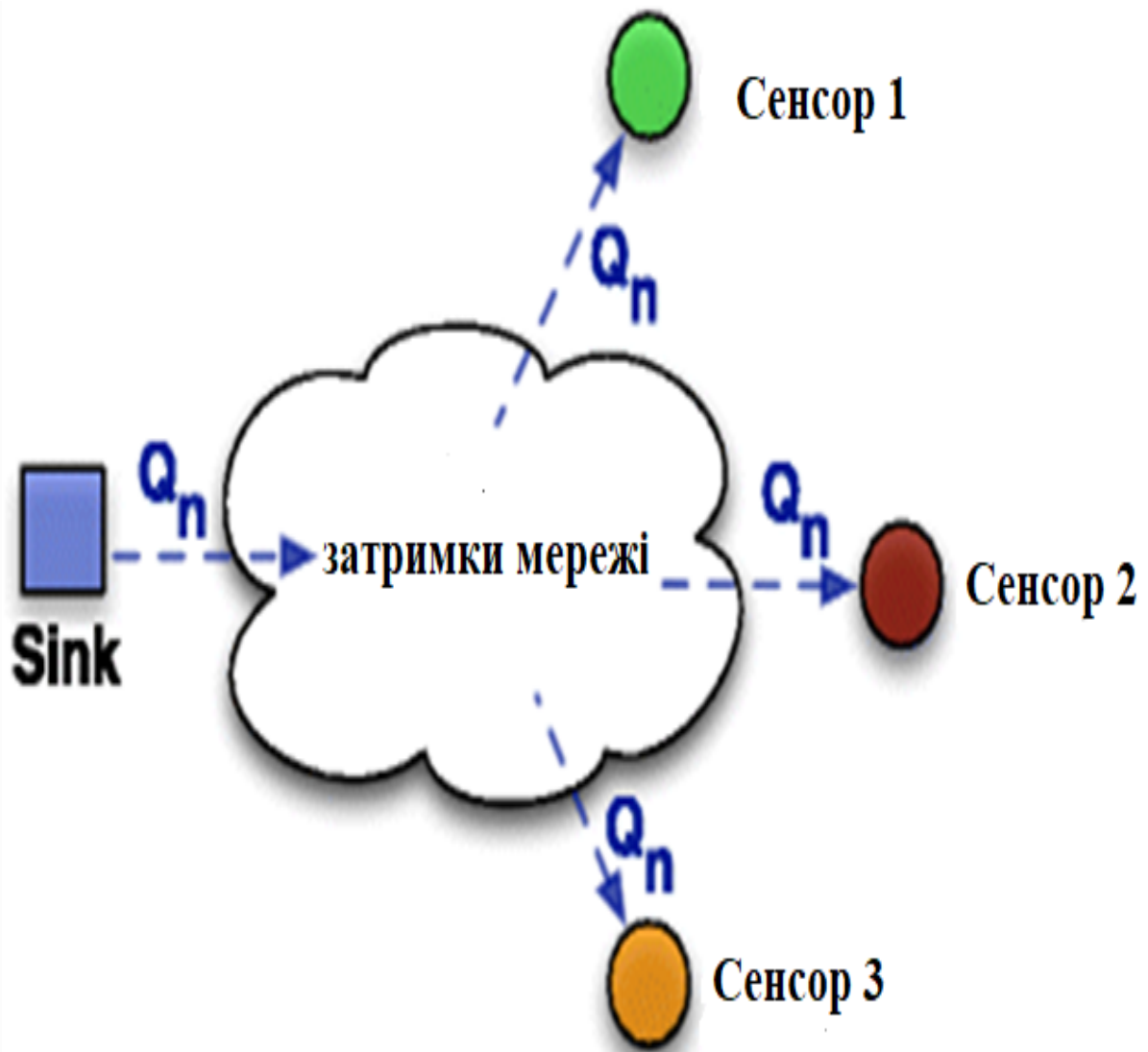


Рис. 3.4. – Модель затримки WSN

Програма на Python була написана для того, щоб випадковим чином генерувати різні розподіли мережових затримок. Програма формує 10^5 запитів, використовує Рівняння. 1, щоб оцінити новий очікуваний час отримання запиту кожним вузлом, і використовує його для налаштування часу, коли кожен вузол повинен спати (Рівняння 2), щоб прокинутися вчасно для наступного циклу застосування. Нарешті, програма обчислює, скільки часу прокидаються вузли одночасно. Ми вважаємо, що вузли одночасно пробуджуються, якщо три датчики пробуджені щонайменше на $\Delta = 80\% \cdot T_{ON}$. Давайте також визначимо як випадкова величина, яка фіксує час, протягом якого три датчики одночасно перебувають у включеному стані, що має

значення (Рис. 3.5.). Поява обчислюється як час, коли перший датчик переходить у режим сну, мінус час пробудження останнього датчика [47].

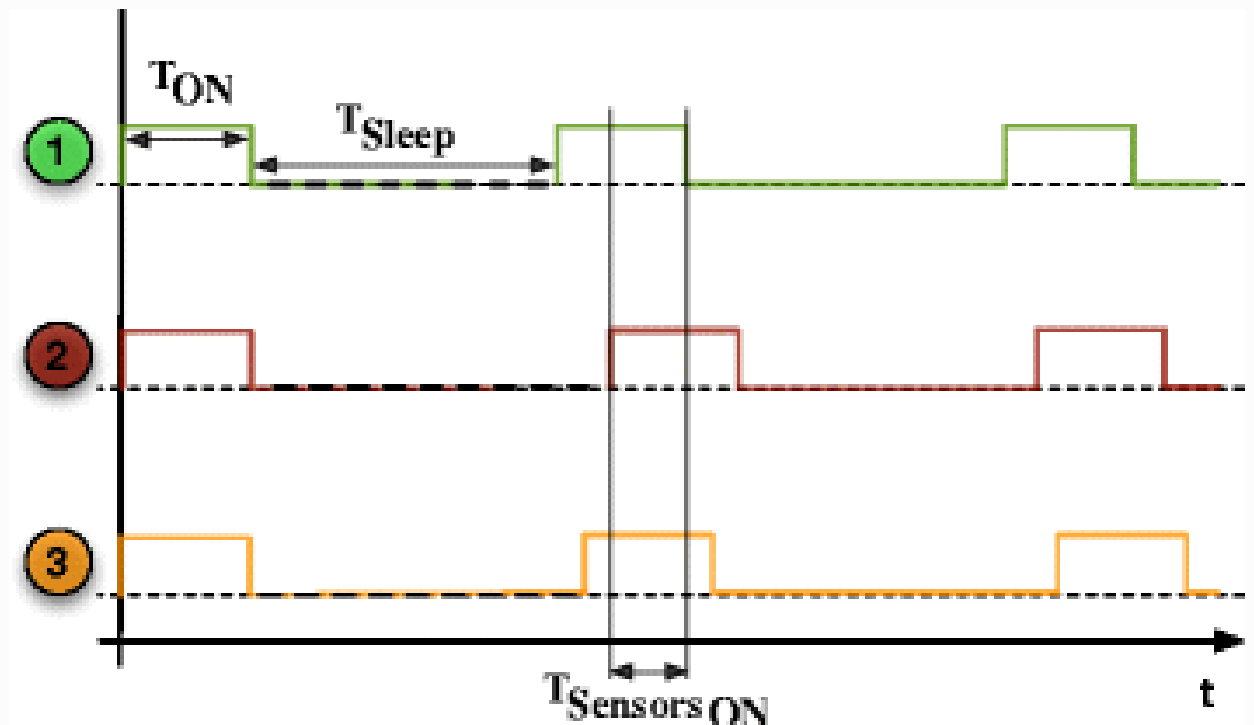


Рис. 3.5. – Вузли регулювання T_{ON}

У першій спробі для α в Рівнянні 1, значення було встановлено на 0,125 відповідно до поточних рекомендацій IETF щодо керування таймерами TCP [3], а для Рівняння 2, значення β було емпірично встановлено на 10. Усі сенсорні вузли прокидаються кожні 15 хвилин, залишаючись неактивними протягом 1 хвилини.

З цього аналізу ми можемо зробити висновок, що механізм синхронізації може бути адекватним для наших цілей. Щоб підвищити довіру до цих результатів, також проводиться аналіз чутливості.

У аналізі чутливості, показаному нижче, ми вибираємо два дискретних набору значень для α і β , $\alpha \in \{0,125,0,5,0,875\}$ і $\beta \in \{1,10,50,100\}$. Ми змінюємо один параметр за раз, залишаючи інший постійним.

α оцінка:

вага, надана останньому зразку в розрахунку δ . Тому ми хочемо дослідити, як він впливає на механізм синхронізації, надаючи α різні значення, а саме 0,125, 0,50 і 0,875.

β оцінка:

оскільки значення $\delta_{k,n}$ з Рівняння 1, ми його посилюємо. Коефіцієнтом посилення є параметр β , для якого ми вибрали три значення $\beta \in \{10,50,100\}$ [48].

Цей аналіз результатів показав, що не всі значення, вибрані для параметрів α і β , задовольняють вимогам нашого механізму синхронізації. Насправді, якщо ми розглянемо, відповідно, $\alpha = 0,50$ і $\beta \in \{50;100\}$, механізм вийде з ладу, оскільки ймовірність, що означає, що вузли датчика не будуть синхронізовані в усіх своїх робочих циклах. Те саме стосується, якщо розглядати $\alpha = 0,875$ і $\beta \in \{50;100\}$, ми можемо спостерігати, що є випадки для нижче 80%, встановленого для успіху порогу, що в середньому дорівнює 97,82% від T_{ON} . Тому ці значення не задовольняють нашим критеріям відбору.

З інших оцінених значень ми можемо вважати, що $\alpha = 0,125$ і $\beta = 10$ є значеннями, які краще задовольняють нашим цілям для розглянутих сценаріїв. У порівнянні з іншою парою значень для α і β , ці значення є одночасно (i) більшими значення 58,7, що майже таке ж теоретичне значення T_{ON} ; (ii) всі входження в термінах T_{ON} перевищують 97%, що в середньому дорівнює 97,82%; (iii) середнє значення $\beta \cdot |\delta_{k,n}|$ компонент має в середньому найнижче значення 0,149, що означає, що сенсорні вузли повинні прокинутися до наступного робочого циклу менше часу, ніж в інших випадках. Це вплине на споживання енергії.

Усі вузли знаходяться на відстані 25 м для дальності передачі 30 м і підтримують одне з двох застосувань. Кожна програма працює у восьми вузлах, і кожен вузол запускає одну програму. У сценарії 1, вузли на яких запущено додаток А (Рис. 3.6.) були обрані таким чином, щоб можна було отримати довгий шлях; у сценарії 2 обидві програми мають однаковий

розподіл вузлів; сценарій 3 використовується для дослідження ситуацій, коли для передачі даних потрібен принаймні один вузол з іншої програми.

У цьому сценарії ми можемо спостерігати, що вузол 9 маршрутизує/пересилає пакети програми, яку він не запускає. У змодельованих сценаріях вузли-приймачі завжди активні, а вузол-приймач запускає програму. В (вузол 9) був обраний як кореневий DAG мережі через його робочий цикл програми. Для вузлів запущеної програми А, $T_{ON}=60$ с, $T_{OFF}=3540$ с; для вузлів, на яких запущена програма В, $T_{ON}=60$ с, $T_{OFF}=840$ с.

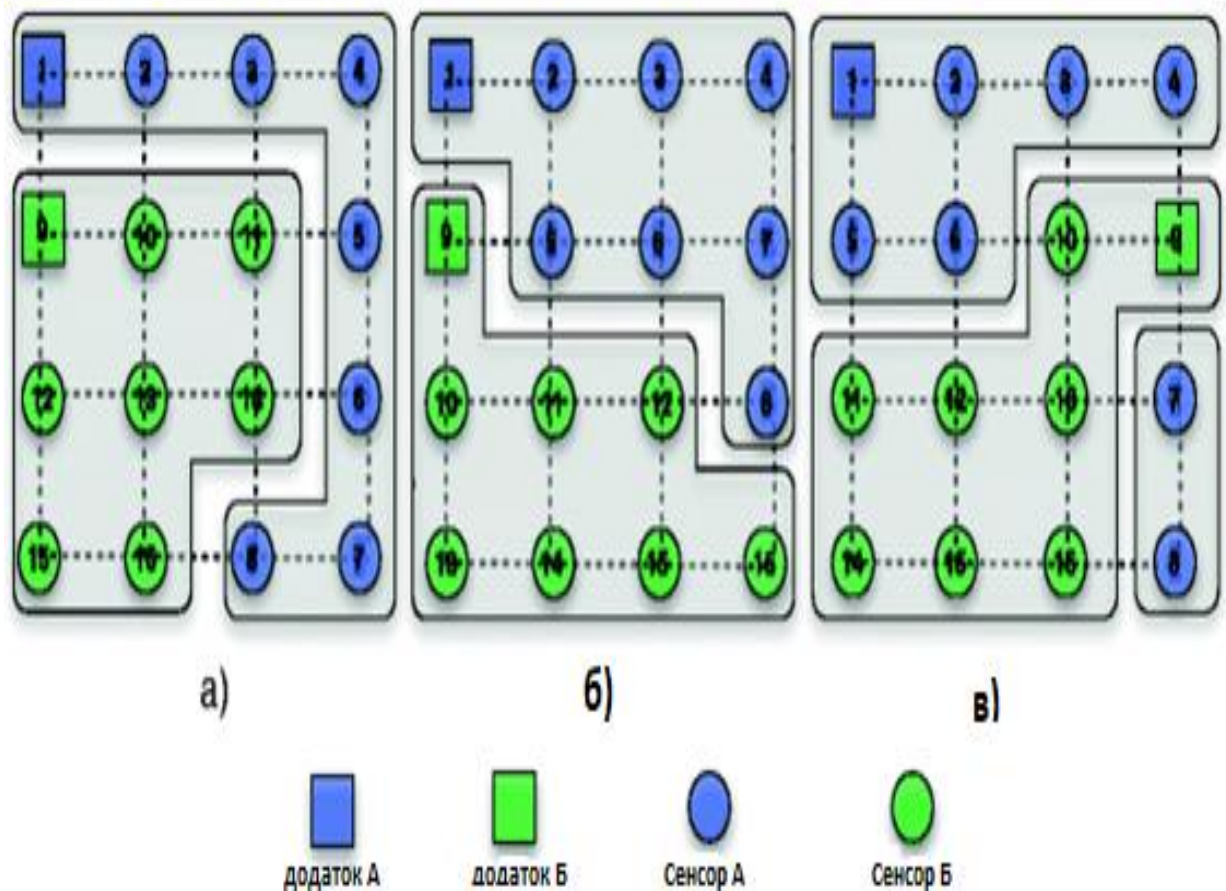


Рис. 3.6. – Огляд змодельованої сенсорної мережі

Ми змодельовали дві ситуації: (i) ситуація, коли всі вузли приєднуються до мережі одночасно, так що запропонований механізм синхронізації не використовується, оскільки в симуляції з *COOJA* дрейф годинника однаковий для всіх вузлів датчиків і (ii) вузли приєднуються до мережі в різний час.

Пізніше передбачається використання механізму синхронізації, описаного в розділі 4, щоб підтримувати синхронізацію вузлів щодо програм, які вони запускають. Вузли приєднуються до мережі в різний час, які були згенеровані випадковим чином між 317 і 1102 с.

Емулюючий мот виконує це завантаження буфера TX з іншою швидкістю, ніж фактичне обладнання. Це може призвести до неточних результатів моделювання. Тим не менш, науковці стверджують, що для досліджуваної програми WSN точність часу не є ключовою проблемою, оскільки програми не розроблені для критичних додатків реального часу.

Методика EWMA, що використовується для керування синхронізацією сенсорних вузлів, також враховує виниклі незрозумілі затримки під час передачі пакетів, щоб оцінити надходження наступного пакета запиту, а результати моделювання та тестування показують, що механізм синхронізації добре працює при різних мережевих затримках. Ця неточність часу не впливає на наш механізм синхронізації. Методика EWMA, що використовується для керування синхронізацією сенсорних вузлів, також враховує виниклі незрозумілі затримки під час передачі пакетів, щоб оцінити надходження наступного пакета запиту, а результати моделювання та тестування показують, що механізм синхронізації добре працює при різних мережевих затримках. Ця неточність часу не впливає на наш механізм синхронізації. Методика EWMA, що використовується для керування синхронізацією сенсорних вузлів, також враховує виниклі незрозумілі затримки під час передачі пакетів, щоб оцінити надходження наступного пакета запиту, а результати моделювання та тестування показують, що механізм синхронізації добре працює при різних мережевих затримках.

У нашому рішенні кожен раз, коли вузол отримує запит, він обчислює час, коли він повинен прокинутися до початку наступного циклу програми, щоб мати можливість отримувати та пересилати пакети та успішно відповідати назад до приймача. Механізм синхронізації був налаштований на $\alpha = 0,125$ і $\beta = 10$.

У моделюванні було використано 16 вузлів, половина з яких запускає кожен сценарій моделювання десять разів, і інформація була вилучена для оцінки затримок, QSR та $E[\beta \cdot |\delta_{k,n}|]$ компонент.

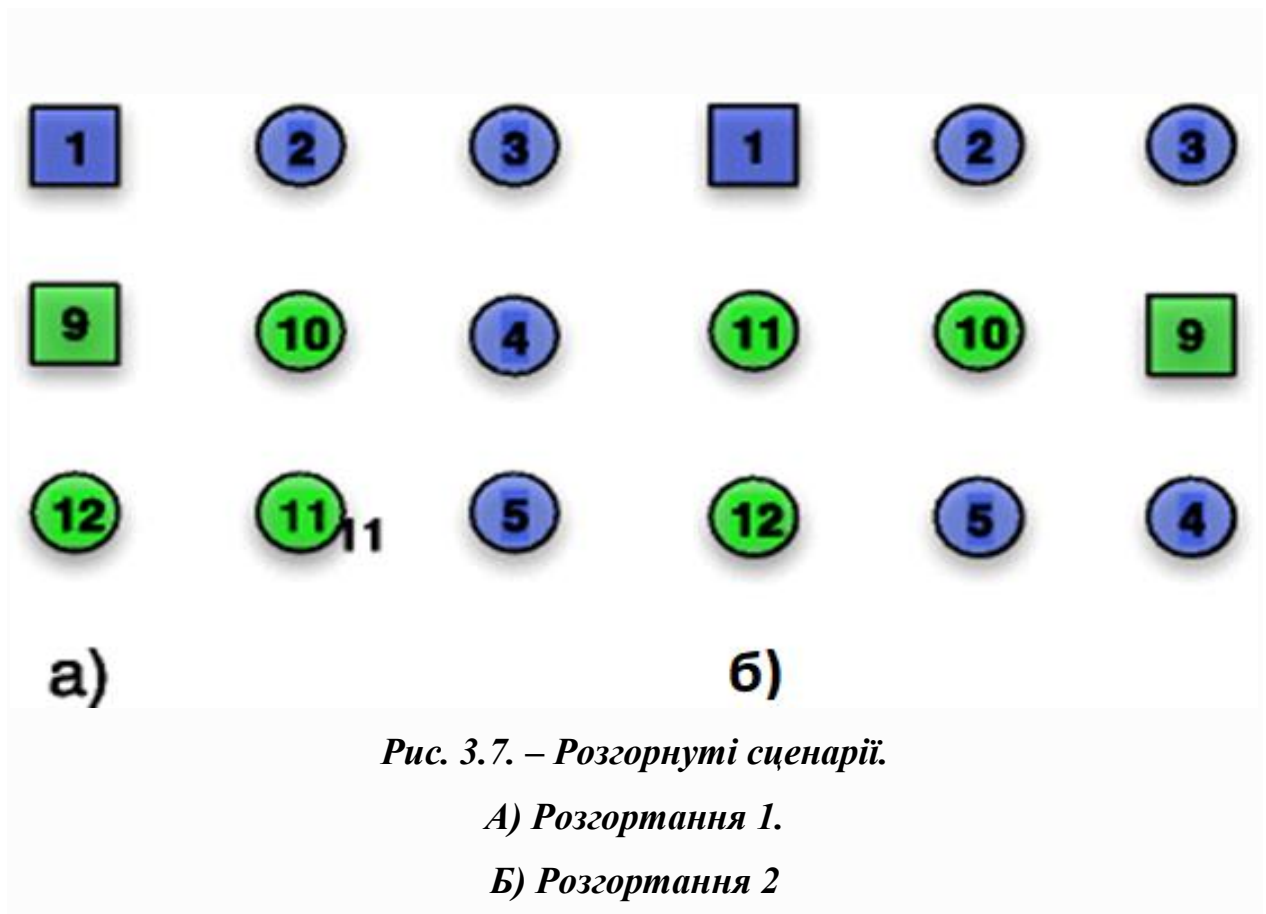
Отримані результати наступні.

Затримки. Ми розглядали затримку як суму всіх затримок на стрибок для кожного прийому пакету запиту датчика і характеризували сумою затримок обробки та черги в проміжних і цільових сенсорних вузлах, а також затримок передачі та поширення в проміжних вузлах.

З моделювання ми витягли інформацію про $\beta \cdot |\delta_{k,n}|$ компонент на основі стрибків. Рис. 3.7. показує діаграму прямокутника для цього компонента в сценарії 1. Ми можемо помітити, що, за винятком першого стрибка, цей компонент має подібні значення на стрибок, і вузли датчиків повинні були б прокидатися із середнім зміщенням сну приблизно 0,232 с. У першому стрибку зміщення сну має більше значення (0,49 с в середньому), тому що в цьому стрибку ми можемо спостерігати деяку перевантаженість, зокрема між вузлом прийому (вузлом 1) і вузлом датчика.

Щоб підтвердити результати, отримані в результаті теоретичних досліджень і моделювання, ми також протестували запропоноване рішення в реальному середовищі. Для цього було відібрано і розгорнуто два з досліджуваних сценаріїв (сценарії 1 і 3). Оскільки неможливо було відтворити їх у тому самому масштабі, розгорнуті сценарії відповідають топології квадратної решітки 3×3 , зберігаючи всі інші функціональні можливості. Щоб отримати надійні умови порівняння, ми змодельовали ці розгортання, використовуючи ті ж методи, і порівняли змодельовані результати з результатами, отриманими на тестових стендах. На Рис. 3.7. показано обидві розгорнуті та змодельовані топології, які були реалізовані за допомогою *TelosB nodes*, розміщені на відстані 5 м, а потужність радіопередачі була зменшена до -7 дБм, щоб зменшити відстань прийому вузла. Додаток А працює в п'яти вузлах (1, 2, 3, 4 і 5), а додаток В — у чотирьох вузлах (9, 10, 11 і 12). Вузол 9, водночас, є коренем DAG і приймачем.

На вузлах працювало *ContikiOS*, яка є операційною системою для WSN, яка включає реалізацію стеку протоколів *IPv6* і використовує *RPL* як протокол маршрутизації за замовчуванням.



ВИСНОВКИ

Під час написання кваліфікаційної магістерської роботи, ми визначили головні поняття дослідження: «бездротова сенсорна мережа» «датчики» «топологія сенсорних мереж» «синхронізація».

Отож, бездротові сенсорні мережі (WSN) відносяться до мереж просторово розподілених і виділених датчиків, які контролюють і записують фізичні умови навколишнього середовища та пересилають зібрані дані в центральне місце. WSN можуть вимірювати умови навколишнього середовища, такі як температура, звук, рівень забруднення, вологість і вітер.

Сенсорні мережі також можна описати їх логічною топологією - методом, який вони використовують для переміщення даних по мережі. Існує два типи логічної топології: спільні медіа та на основі маркерів. У топології спільного медіа всі вузли можуть отримати доступ до транспортного медіа, коли захочуть. Це може призвести до зіткнень, якими необхідно керувати за допомогою протоколу уникнення зіткнень.

Бездротовий датчик – це технологія, на яку звертає увагу кожна країна, а синхронізація годинника також вважається найважливішою частиною бездротової сенсорної мережі.

Синхронізація - це координація подій для одночасного управління системою. Наприклад, диригент оркестру підтримує оркестр синхронно або вчасно.

Проаналізували особливості бездротових сенсорних мереж. Зробили огляд радіоінтерфейсів у бездротових сенсорних мережах.

Провели загальну характеристику поширення радіосигналу. Проаналізували моделі розповсюдження. Розглянули характеристики проблеми синхронізації тактового сигналу датчика. Зясували синхронізацію годинника RBS та його вдосконалення. Порівняли продуктивності різних методів синхронізації час.

Розробили програмне забезпечення для синхронізації бездротової сенсорної мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Itani W., Kayssi A., Chehab A. Wireless Body Sensor Networks: Security, Privacy, and Energy Efficiency in the Era of Cloud Computing // Int. J. Reliab. Qual. E-Healthcare. 2016. Vol. 5, № 2.
2. Sathiyaraj R., Bharathi A. An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multi-agent system // Transport. 2020. Vol. 35, № 3.
3. Neville-Neil G. V. Time is an illusion lunchtime doubly so // Commun. ACM. 2016. Vol. 59, № 1.
4. Волошко С.В., Курца Д.О. Інформаційна безпека в безпроводових сенсорних мережах. ПолтНТУ, 2018.
5. Qadori H.Q. et al. A spawn mobile agent itinerary planning approach for energy-efficient data gathering in wireless sensor networks // Sensors (Switzerland). 2017. Vol. 17, № 6.
6. Ponde S., Lomte S. An Energy-Efficient MAC Protocols for Wireless Sensor Networks // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1025.
7. Kuntz R., Gallais A., Noël T. Auto-adaptive MAC for energy-efficient burst transmissions in wireless sensor networks // 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2011. 2011.
8. Saravanan S., Poovazhaki R., Shanker N.R. Cluster Topology in WSN with SCPS for QoS // Wirel. Pers. Commun. 2018. Vol. 99, № 3.
9. Casares-Giner V. et al. End to end delay and energy consumption in a two tier cluster hierarchical Wireless Sensor Networks // Inf. 2019. Vol. 10, № 4.
10. IEEE S.A. IEEE 802.15.4z-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015).

2020. Vol. 2020.
11. Al-Rakhami M., Almowuena S. *Wireless Sensor Networks Security: State of the Art*. 2018.
 12. Li R., Wang J., Chen J. *Movable platform-based topology detection for a geographic routing wireless sensor network // Sensors (Switzerland)*. 2020. Vol. 20, № 13.
 13. Salleh N.M., Mahiddin N.A. *MANET performance measurement of DYMO routing protocol by varying density and mobility speed // Int. J. Eng. Trends Technol*. 2020. № 1.
 14. Rachelin Sujae P., Arulselvi S. *Receiver-initiated medium access control (RI-MAC) protocols // Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng*. 2019. Vol. 8, № 8.
 15. Arbia D. Ben et al. *Wearable D2D Routing Strategies for Urban Disaster Management – A Case Study*. 2019.
 16. Tomić I., McCann J.A. *A Survey of Potential Security Issues in Existing Wireless Sensor Network Protocols // undefined. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. Vol. 4, № 6. P. 1910–1923*.
 17. Upadhyay D., Dubey A.K., Thilagam P.S. *Application of non-linear Gaussian regression-based adaptive clock synchronization technique for wireless sensor network in agriculture // IEEE Sens. J*. 2018. Vol. 18, № 10.
 18. Azad A.K., Alam M.S., Shawkat S.A. *DCDS-MAC: A dual-channel dual-slot MAC protocol for delay sensitive wireless sensor network applications // J. Commun*. 2019. Vol. 14, № 11.
 19. Ковальова Ю. *МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В МЕРЕЖАХ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ // Syst. Technol*. 2021. Vol. 6, № 131.
 20. *IEEE Std 802.11 -2012. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11-2012*

- (Revision IEEE Std 802.11-2007). 2016. Vol. 2016.
21. Ayoub W. et al. Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2019. Vol. 21, № 2.
 22. Zhang T., Li X. Design of wireless sensor network node based on CyFi technology and ARM7 system // J. Chem. Pharm. Res. 2014. Vol. 6, № 6.
 23. Dong Z. et al. Energy Efficiency Optimization and Resource Allocation of Cross-Layer Broadband Wireless Communication System // IEEE Access. 2020. Vol. 8.
 24. Kaburaki A. et al. Autonomous Decentralized Traffic Control Using Q-Learning in LPWAN // IEEE Access. 2021. Vol. 9.
 25. Rikhtegar N., Keshtgari M., Ronaghi Z. EEWNSN: Energy Efficient Wireless Nano Sensor Network MAC Protocol for Communications in the Terahertz Band // Wirel. Pers. Commun. 2017. Vol. 97, № 1.
 26. Rikli N.E., Al-Mazroa A. Design of an adaptive medium access control protocol for wireless body area networks with heterogeneous sensors // Int. J. Distrib. Sens. Networks. 2019. Vol. 15, № 7.
 27. Seth G., Harisha A. Energy efficient timing-sync Protocol for Sensor Network // 2015 International Conference on Computing and Network Communications, CoCoNet 2015. 2016.
 28. Kolar N.B., Gondkar R.R. Adaptive energy efficient mac protocol for increasing life of sensor nodes in wireless body area network // Int. J. Eng. Trends Technol. 2020. Vol. 68, № 1.
 29. Pande H., Kharat M.U. Modified WiseMAC protocol for energy efficient wireless sensor networks with better throughput // 2016 International Conference on Internet of Things and Applications, IOTA 2016. 2016.
 30. Et. al. K.L.V.S.P.S. A Novel Loop Based Fine Grained Network-wide Time

- Synchronization over Constrained Delay Paths in Wireless Sensor Networks // Turkish J. Comput. Math. Educ. 2021. Vol. 12, № 4.
31. Hilmani A., Maizate A., Hassouni L. Hierarchical Protocol Based on Recursive Clusters for Smart Parking Applications Using Internet of Things (IOT) // Wirel. Commun. Mob. Comput. 2020. Vol. 2020.
 32. Chen D.R., Chiu W.M. Collaborative Link-Aware Protocols for Energy-Efficient and QoS Wireless Body Area Networks Using Integrated Sensors // IEEE Internet Things J. 2018. Vol. 5, № 1.
 33. Chen Z., He Y.X., Huang S.Y. Medium access control based on adaptive sleeping and probabilistic routing for delay tolerant mobile sensor networks // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 457–458.
 34. Остапенко О.О., Романюк В.А., Жук А.В. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРОТОКОЛІВ УПРАВЛІННЯ В БЕСПРОВОДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ». 2016.
 35. Bilandi N., Verma H.K., Dhir R. An Energy Efficient TDMA based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks // ICSCCC 2018 - 1st International Conference on Secure Cyber Computing and Communications. 2018.
 36. Kgogo T., Isong B., Abu-Mahfouz A.M. Software defined wireless sensor networks security challenges // 2017 IEEE AFRICON Sci. Technol. Innov. Africa, AFRICON 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. P. 1508–1513.
 37. Patil H.K., Chen T.M. Wireless Sensor Network Security: The Internet of Things // Comput. Inf. Secur. Handb. 2017.
 38. Zheng Z. et al. Time-Sliced Flexible Resource Allocation for Optical Low Earth Orbit Satellite Networks // IEEE Access. 2019. Vol. 7.

39. Wang J. et al. Priority-aware price-based power control for co-located WBANs using stackelberg and bayesian games // *Sensors (Switzerland)*. 2019. Vol. 19, № 12.
40. Gao Y. et al. COPE: Improving energy efficiency with coded preambles in low-power sensor networks // *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 2015. Vol. 11, № 6.
41. Романов В.О., Галелюка І.Б., Остапенко В.О. Вимоги до забезпечення функціональної та інформаційної безпеки бездротових сенсорних мереж. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2017.
42. Chen H. et al. PWEND: Proactive wakeup based energy-efficient neighbor discovery for mobile sensor networks // *Ad Hoc Networks*. 2020. Vol. 107.
43. Li F., Ju L., Jia Z. Data aggregation framework for energy-efficient WirelessHART networks // *J. Syst. Archit*. 2016. Vol. 63.
44. Dehshalie M.E. et al. Finite-time distributed global optimal control for linear time-varying multi-agent systems: A dynamic output-feedback perspective // *IET Control Theory and Applications*. 2018. Vol. 12, № 9.
45. Галелюка І.Б., І.Б. Моделювання бездротових сенсорних мереж. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2015.
46. Mills D.L. Computer Network Time Synchronization // *Computer Network Time Synchronization*. 2017.
47. Roy A., Sarma N. A synchronous duty-cycled reservation based MAC protocol for underwater wireless sensor networks // *Digit. Commun. Networks*. 2020.
48. Kaur P., Singh P., Sohi B.S. Adaptive MAC Protocol for Solar Energy Harvesting Based Wireless Sensor Networks in Agriculture // *Wirel. Pers. Commun*. 2020. Vol. 111, № 4.