

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С. _____

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2018_р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

на тему: «Розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах»

Виконав студент 2_ курсу, групи ТЗ-71мп

Брицун Андрій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник Лисенко Олександр Іванович

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

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

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 рік

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Брицуну Андрію Васильовичу

1. Тема дисертації: «Розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах»

науковий керівник дисертації: д. т. н. Лисенко Олександр Іванович

затверджені наказом по університету від «_06_» «_11_» 2018р. №_4095-с_

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: безпроводові сенсорні мережі.

4. Предмет дослідження: розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1) Вирішення задачі адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог сенсорних мереж.

2) Аналіз існуючих методів синхронізації вузлів безпроводових сенсорних мереж.

3) Удосконалення моделі БСМ з урахуванням критичних особливостей їх застосування.

4) Аналіз та вдосконалення методу прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників.

5) Проведення імітаційного експерименту для доведення достовірності розвинутих методів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного мвтеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук та опрацювання літератури з теми наукового дослідження.	Вересень-жовтень 2017	
2	Розгляд та детальне вивчення основних принципів побудови та функціонування безпроводових сенсорних систем. Огляд сучасних матеріалів та публікацій по результатам наукових досліджень в даній сфері.	Листопад-грудень 2018	
3	Знаходження шляхів підвищення ефективності синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах.	Січень 2018	
4	Аналіз стандартів, які використовуються в персональних, локальних і міських мережах для вирішення завдань БСМ.	Лютий-березень 2018	
5	Моделювання режимів роботи безпроводових сенсорних мереж. Пошук можливостей оптимізації режимів роботи сенсорів-складових БСМ.	Квітень-травень 2018	
6	Аналіз методів підвищення надійності функціонування БСМ.	Червень 2018	
7	Розробка методу синхронізації на основі оптимізації мурашиної колонії	Серпень 2018	
8	Суть методу прицензійної синхронізації з використанням двох локальних годинників. Калібрування годинників.	Вересень-жовтень 2018	
9	Підбиття підсумків, оформлення та редакування розділів роботи.	Листопад-грудень 2018	

Студент _____

(підпис)

Брицун А. В.

Керівник проекту (роботи) _____

(підпис)

Лисенко О. І.

РЕФЕРАТ

Робота містить 92 сторінки. Було використано 43 джерел.

Мета роботи: аналіз існуючих протоколів синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах, розгляд їх особливостей, характеристик та тенденцій розвитку.

В роботі розглянуто унікальні властивості БСМ, які унеможливають використання протоколів синхронізації, котрі застосовуються в звичайних безпроводових мережах; розглянуто основні підходи, які застосовуються в якості базових для розробки і впровадження нових технологій і алгоритмів синхронізації. Наведено вимоги, яким повинні відповідати протоколи синхронізації.

Було запропоновано та допрацьовано метод прецизійної синхронізації на основі швидких та повільних локальних годинників.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, синхронізація, годинник, час, вузол, датчик, затримка.

ABSTRACT

The work contains 92 pages, 43 sources have been used.

Purpose is to analyze existing time synchronization protocols in wireless sensor networks, examine their features, characteristics and trends.

WSN unique properties have been considered, that make it impossible to use synchronization protocols, which are used in conventional wireless networks; the main approaches that are used as base for the development and implementation of new technologies and algorithms for synchronization. There are also have been provided requirements for the synchronization protocols.

A precision synchronization method based on fast and slow local clocks was proposed and refined.

Key words: wireless sensor networks, synchronization, clock, time, unit, sensor, delay.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....

ВСТУП

1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

- 1.1. Структура існуючих сенсорних мереж
- 1.2. Датчики та сенсори
- 1.3. Топології сенсорних мереж та їх основні структурні компоненти
- 1.4. Класифікація безпроводових мереж за масштабом дії
- 1.5. Операційна система
- 1.6. Технічні обмеження та складнощі реалізації
- 1.7. Відмінності безпроводових сенсорних мереж від традиційних
- 1.8. Енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах
- 1.9. Сфери застосування безпроводових сенсорних мереж

Висновки до розділу 1

2. ОСОБЛИВОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

- 2.1. Проблема синхронізації
- 2.2. Важливість синхронізації
- 2.3. Вимоги до синхронізації в БСМ
 - 2.3.1. Врахування впливу зовнішніх умов
 - 2.3.2. Енергетичні обмеження
 - 2.3.3. Безпроводове середовище та мобільність
 - 2.3.4. Інші обмеження

Висновки до розділу 2

3. РОЗВИТОК СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БСМ НА ОСНОВІ ГОДИННИКІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

- 3.1 Годинники в розподілених системах
- 3.2 Визначення годинників
- 3.3 Неточності годинників
- 3.4 Підходи до синхронізації
 - 3.4.1 Метод дистанційного зчитування годинників

					КПІ ім. Сікорського 4095-с 02ТЗ-71мп.2018.ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Брицун А. В.					?	9?
Перевір.		Лисенко О. І.						
Реценз.		Мошинська А.						
Н. Контр.		Петрова В.М.						
Затверд.		Явісія В. С.						

- 3.4.2 Односторонній обмін повідомленнями
- 3.4.3 Двосторонній обмін повідомленнями
- 3.4.4 Приймач-приймач синхронізація (RRS)
- 3.4.5 Компоненти затримки в доставці повідомлень
- 3.4.6 Передавач-приймач синхронізація (SRS)
- 3.4.7 Синхронізація лише приймача (ROS)
- 3.4.8 Порівняльна характеристика SRS, RRS та ROS

3.5 Вимоги до протоколів синхронізації

3.6 Класифікація протоколів синхронізації часу

3.6.1 Концепції забезпечення синхронізації

3.6.2 Методи синхронізації відповідно до особливостей мереж

Висновки до розділу 3

4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРОТОКОЛІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ

4.1. Стислий огляд

4.2. Reference Broadcast Synchronization

4.3. Lightweight time synchronization

4.4. Timing-sync Protocol

4.5. Flooding Time Synchronization Protocol

4.6. Pairwise Broadcast Synchronization

Висновки до розділу 4

5. МЕТОД ПРЕЦИЗИЙНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКИХ ТА ПОВІЛЬНИХ ЛОКАЛЬНИХ ГОДИННИКІВ

5.1 Постановка задачі

5.2 Основна ідея методу

5.3 Врахування температурних поправок

5.4 Процедура калібрування повільних годинників по швидких

5.5 Алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ

Висновки до розділу 5:

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

					КПІ ім. Сікорського 4095-с 02ТЗ-71мп.2018.ПЗ	Арк.
						?
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

NGN – (Next Generation Network) – мережа наступного покоління

FFD - (Full Function Device) – повнофункціональний пристрій

RFD - (Reduced Function Device) – пристрої з обмеженим набором функцій

CRC (Cyclic Redundancy code) – циклічний надлишковий код

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) – множинний доступ з контролем несучої і униканням колізій

IoT (Internet of Things) - Інтернет речей

GPRS (General Packet Radio Service) — загальний сервіс пакетної радіопередачі

GPS (Global Positioning System) – система глобального позиціонування

MAC (Media Access Control) – рівень управління доступом до середовища

OSI (Open Systems Interconnection) – еталонна модель взаємодії відкритих систем

LTS (Lightweight time synchronization) – легка деревовидна синхронізація

NTP (Network Time Protocol) – протокол мережевого часу

PBS (Pairwise Broadcast Synchronization) – попарна ширококомвна синхронізація

RBS (Reference Broadcast Synchronization) – синхронізація ширококомвної передачі

ROS (Receiver-only synchronization) – синхронізація лише приймача

RRS (Receiver-to-receiver synchronization) – приймач-приймач синхронізація

SRS (Sender-to-receiver synchronization) – передавач-приймач синхронізація

TDMA (Time Division Multiple Access) – доступ з розділенням у часі

TDP (Time-Diffusion Synchronization Protocol) – протокол дифузійної синхронізації

UTC (Coordinated Universal Time) – всесвітній координований час

WAN (Wide Area Network) – глобальна мережа

WLAN (Wireless Local Area Network) – безпроводова локальна мережа

WPAN (Wireless Personal Area Network) – безпроводова персональна мережа

WSN (Wireless Sensor Network) – безпроводова сенсорна мережа

ВСТУП

Новітні технології безпроводового зв'язку і прогрес в області виробництва мікросхем дозволили протягом останніх кількох років перейти до практичної розробки та впровадження нового класу розподілених комунікаційних систем - сенсорних мереж, які є дуже масштабованими і гнучкими, що робить їх придатними для спостереження і моніторингу багатьох аспектів фізичного світу в різних областях. Великий інтерес до вивчення сенсорних мереж обумовлений широкими можливостями їх застосування. БСМ все частіше знаходить своє застосування в різних галузях, де використання звичайних безпроводних мереж не раціональне, ускладнене, або і зовсім неможливе. Різноманітність доступних датчиків і виконавчих механізмів, простота розгортання та експлуатації, надійність, компактність і порівняно низька вартість сприяю поширенню і зростанню кількості застосувань таких мереж, в тому числі як складових більш глобальних систем, наприклад, Інтернету речей.

Об'єктом дослідження є безпроводові сенсорні мережі.

Предметом дослідження є розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах.

Проблема, що вирішується: забезпечення передачі інформації в безпроводовій сенсорній мережі в умовах обмеженого енергетичного та обчислювального ресурсів і покращення показників якості передачі даних без впливу на тривалість часу життя мережі.

Актуальність теми даної роботи обумовлена стрімким розвитком безпроводового зв'язку в світі в цілому та БСМ, зокрема як складовою Інтернету речей (IoT). Аспект синхронізації для них є критично важливим, оскільки проектування багатьох протоколів і успішна реалізація програм вимагають точного часу. Для ефективної комунікації між вузлами мережі (встановлення і проведення сеансів зв'язку з мінімальними витратами енергії) з метою передачі даних також потрібна ефективна синхронізація часу.

Мета – розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах шляхом покращення енергоефективності мережі та показників синхронізації часу.

Практичні задачі, на вирішення яких спрямовано проект:

- проведення детального аналізу існуючих протоколів і підходів до синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах;
- дослідження їх переваг і недоліків;
- на основі проведеного порівняльного аналізу запропонувати рішення, яке дозволило б покращити ефективність часової синхронізації в БСМ.

Значимість проекту для розв’язання економічних і соціальних

проблем: підвищення ефективності роботи систем безпроводового сенсорного зв’язку державних, військових, сільськогосподарських та інших комерційних структур у разі їх використання як у звичайних умовах, так і у важкодоступних місцях та на місцевості зі складним рельєфом.

Наукові задачі досліджень:

- Вирішення задачі адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог безпроводових сенсорних мереж (які є складовою концепції інтернету речей, котра набуває широкої популярності та бурхливо розвивається).
- Удосконалення моделі БСМ з урахуванням вимог до її продуктивності та працездатності в умовах обмежених ресурсів та стійкості в умовах критичних ситуацій.
- Розробка методу прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників.
- Проведення імітаційного експерименту для доведення достовірності розвинутих методів.

Наукова новизна. Проаналізований та доповнений метод прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників. Запропонований алгоритм підтримки синхронізації та алгоритм розрахунку часу наступного сеансу зв’язку в БСМ.

Практична значимість отриманих результатів. Розроблені в магістерській дисертації положення та концепції є методологічною основою для

підвищення енергозбереження та ефективності функціонування БСМ, що дозволить:

- підвищити достовірність передачі інформації в мережевих потоках та скоротити час доставки повідомлення;
- підвищити рівень енергозбереження БСМ.

Отримані в результаті роботи над магістерською дисертацією результати можуть бути використані організаціями-замовниками, які займаються моніторингом стану довкілля та інших фізичних систем, системами сигналізації і т. д., а також науково-дослідними організаціями для проведення нагляду та спостереження над різними проектами та розробками.

1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1. Структура існуючих сенсорних мереж.

Безпроводова сенсорна мережа (Wireless Sensor Network) - це розподілена, зі здатністю до самоорганізації мережа великої кількості датчиків (сенсорів, мотів - від англ. "Mote" - порошинка, названих так через тенденцію до мініатюризації) і виконавчих пристроїв (рис.1), об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Область покриття подібної мережі може становити від декількох метрів до декількох кілометрів за рахунок здатності ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого. В склад мотів зазвичай входять автономні мікрокомп'ютери (контролери) з живленням від батарей і приймачі, що дозволяє мотам самоорганізовуватися в спеціалізовані мережі, зв'язуючись один з одним і обмінюючись даними за допомогою радіозв'язку. В цьому випадку, моти виступають як компоненти безпроводових сенсорних мереж. Дані від окремих вузлів передаються по мережі від вузла до вузла на шлюз, і зазвичай виявляються на «супер-вузлі», або сервері, маючому більш високу обчислювальну потужність.

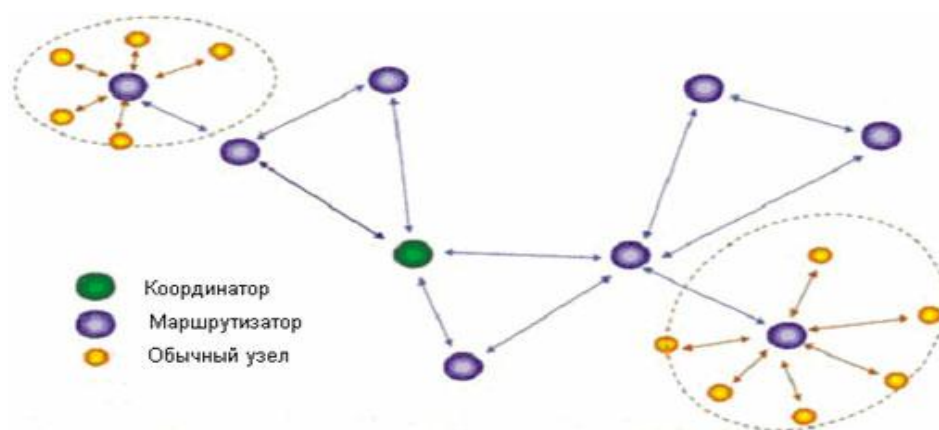


Рис. 1.1 Архітектура безпроводової сенсорної мережі

1.2. Датчики та сенсори

Базовим елементом сенсорних мереж є сенсори (моти) - пристрої, що поєднують в собі відразу три функції: вимірвальну, обчислювальну та комунікаційну.

Основним елементом, що відрізняє БСМ від інших мереж, є перетворювач - датчик або виконавчий механізм. З технічної точки зору, датчик - це пристрій, який перетворює параметри або події фізичного світу в сигнали, які можуть бути виміряні, проаналізовані та передані в обчислювальну систему або контролер. Температурні, акустичні, сейсмічні датчики, датчики тиску, вологості хімічного складу, орієнтації, прискорення, пристрої управління двигунами, електромеханічними реле і клапанами, випромінювачами - цей список можна довго продовжувати, а область техніки, що займається їх розробкою і використанням, чи не найбільша в сучасному світі. Широкий спектр різних варіантів реалізації цих пристроїв з одного боку дає велику свободу при розробці сенсорів, а з іншого вимагає кожен раз заново вирішувати проблему конструктивного виконання датчика і інтерфейсу з процесорною або передавальною частиною.

Сучасні моти мають досить низьке питоме споживання потужності, що припадає на 1 млн. операцій. У зв'язку з цим стає актуальним питання про попередню обробку даних перед їх передачею. Дійсно, сучасні ЦПОСи (Цифрові процесори обробки сигналів) мають обчислювальну потужність, порівняну з вчорашніми персональними ЕОМ. Якщо врахувати, що мережа складається з великого числа мотів, то практично маємо величезну розподілену обчислювальну систему, ресурси якої можна направити на передопрацювання даних для підвищення ефективності роботи всієї системи. Про більшість методів обробки можна сказати, що вони на основі даних великого обсягу виділяють корисну інформацію, представляючи її в меншому обсязі даних.

Комунікаційні функції моти здійснюють за принципами Ad-hoc мереж - децентралізованих безпроводових мереж, які не мають постійної структури. Клієнтські пристрої з'єднуються «на льоту», утворюючи собою мережу. Кожен вузол мережі намагається переслати дані, призначені іншим вузлам. При цьому визначення того, яким вузлу пересилати дані, проводиться динамічно, на підставі зв'язності мережі. Це є відмінністю від проводових мереж і керованих безпроводових мереж, в яких завдання управління потоками даних виконують

маршрутизатори (в проводових мережах) або точки доступу (в керованих безпроводових мережах). Вибір алгоритму маршрутизації - одне з найскладніших питань, що вирішуються при проектуванні сенсорної мережі. По-перше, маршрутизація вимагає координації роботи всіх вузлів мережі. По-друге, алгоритм маршрутизації повинен справлятися з виходами з ладу вузлів шляхом перенаправлення трафіку і оновлення баз даних. По-третє, для досягнення найкращих результатів алгоритм маршрутизації повинен мати можливість змінювати маршрути при перевантаженні деяких областей мережі.

Особлива увага при проектуванні мотів приділяється джерелам електроживлення. У зв'язку з тим, що вузол БСМ повинен споживати гранично малу потужність (50 мкВт і нижче), ефективними можуть здатися такі альтернативні джерела енергії як сонячні елементи, перетворювачі вібрації і навіть фонового радіовипромінювання у струм. Однак ці джерела досі досить дорогі, а їх використання вимагає обов'язкової наявності відповідних властивостей зовнішнього середовища. Найбільш надійним джерелом електричної енергії до сих пір залишаються електричні акумулятори та батареї.

1.3. Топології сенсорних мереж та їх основні структурні компоненти

Під топологією (компонуванням, конфігурацією) безпроводової сенсорної мережі звичайно розуміється фізичне розташування елементів мережі (датчиків) один щодо іншого та спосіб їх з'єднання лініями зв'язку.

Сенсорні мережі будуються з використанням двох типів фізичних пристроїв (рис.1.7): повнофункціонального пристрою (Full Function Device, FFD) та пристрою з обмеженим набором функцій (Reduced Function Device, RFD) [34].

Повнофункціональні мережні пристрої функціонують у трьох режимах (в залежності від початкової конфігурації): координатор, маршрутизатор і кінцевий вузол, а пристрої RFD – тільки в режимі кінцевого вузла [36].

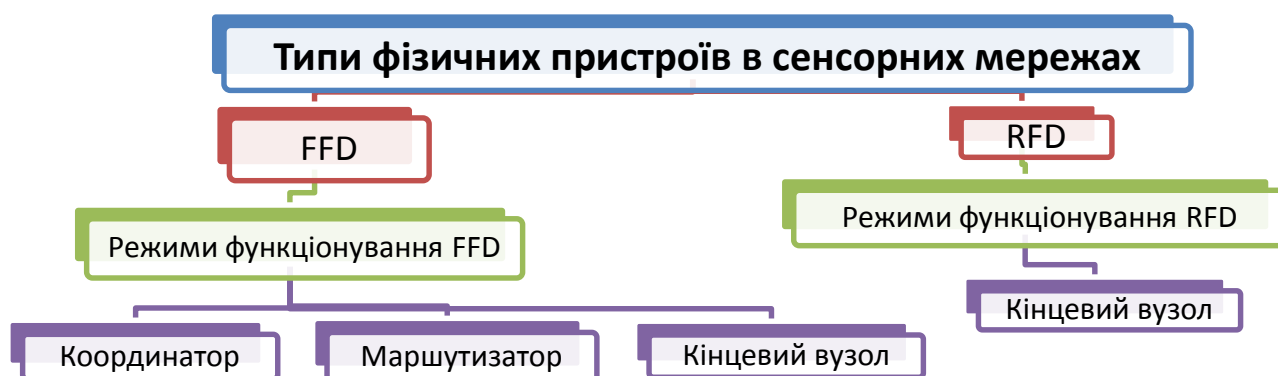


Рис. 1.2. Типи фізичних пристроїв та їх режими функціонування

Пристроєм FFD може здійснюватися зв'язок як з кількома FFD, так і кількома RFD, в той час як у пристрої RFD не реалізована функція встановлення зв'язку з іншими RFD (рис.1.8). Для пристроїв FFD характерна наявність великих обчислювальних ресурсів і великого обсягу пам'яті, оскільки у ньому реалізується оцінка якості каналу зв'язку до іншого пристрою, вибір маршруту передачі даних по мережі і т.д.

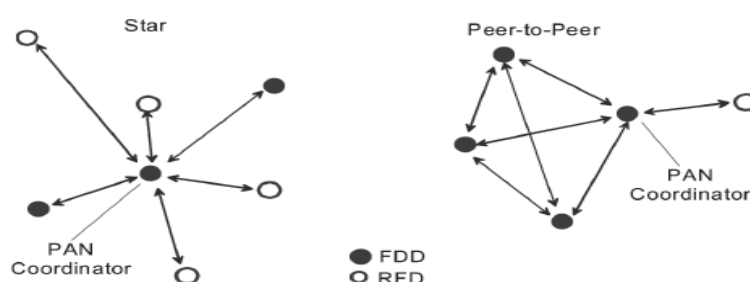


Рис. 1.3. Встановлення зв'язку між різними фізичними пристроями сенсорних мереж на прикладі базових топологій

Кінцеві вузли (сенсори) – стаціонарні або мобільні повнофункціональні або ж з обмеженим набором функцій пристрої, що є джерелами/приймачами інформації, організують інтерфейс між периферійним обладнанням (лічильники, датчики і т.д.) і самою системою.

Маршрутизатор – повнофункціональний пристрій, розширює зону покриття системи й кількість сполучених вузлів, може виступати в ролі кінцевого вузла системи.

Координатор – повнофункціональний пристрій, який також служить шлюзом до зовнішніх мереж передачі даних, таких як Ethernet або GPRS. Функція координатора полягає у визначенні номеру частотного каналу, по якому працює система, і призначенні ідентифікатора сенсорам; у пам'яті координатора зберігається основна частина інформації про систему та вузли, що входять до її структури; перевірка нових вузлів, що підключаються до системи; розсилка повідомлень загальносистемної синхронізації та інші функції вузла аутентифікації. До координатору підключаються маршрутизатори і кінцеві пристрої, кількість яких можна нарощувати. Функціональний поділ фізичних пристроїв дозволяє будувати БСМ декількох топологій, які за методом організації можуть бути (рис. 1.10) [30]:

- децентралізовані (рис.1.4 а);
- централізовані та ієрархічні (рис.1.4 б);
- гібридні.

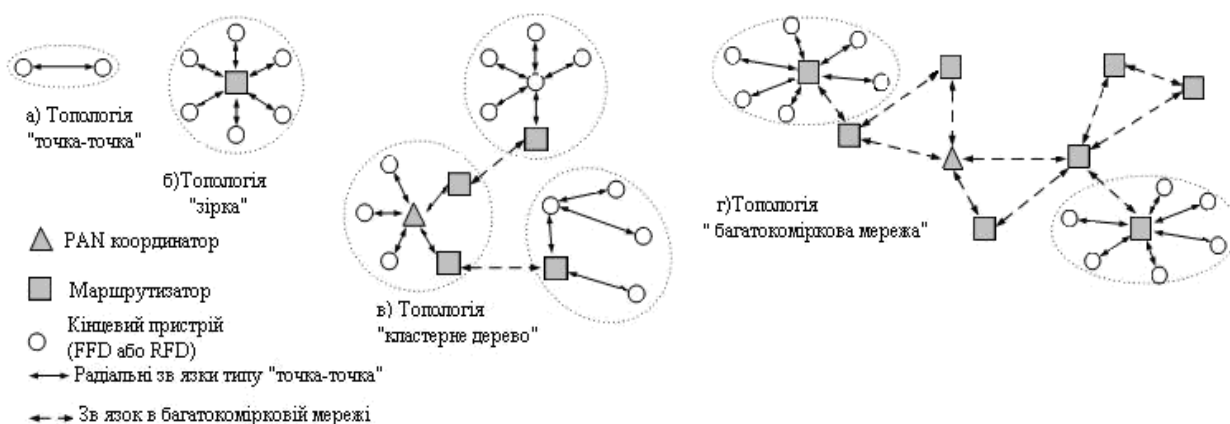


Рис. 1.4. Топології сенсорних мереж: а) «точка-точка»; б) «зірка»; в) «кластерне дерево»; г) «багатокоміркова мережа»

При децентралізованій структурі система складається з рівноправних мережних вузлів, в таких системах кожен пристрій встановлює з'єднання з сусідніми вузлами для передачі інформації з використанням багаторазової ретрансляції (топологія системи типу «точка-точка», рис. 1.9 а). При такій структурі один або кілька сенсорів мають доступ до зовнішнього шлюзу, підключеного до інших систем (дротових, безпроводових, мобільних і ін.).

Централізована структура передбачає наявність у ній одного маршрутизатора, який функціонує як центральна станція – концентратор, що приймає рішення маршрутизації агрегованих даних до наступного вузла. Топологія побудови таких систем відповідає типу «зірка» (рис. 1.9 б).

Ієрархічна структура системи належить до централізованої. Вона передбачає розбиття системи на кластери і має декілька рівнів ієрархії, на верхньому рівні якої знаходиться головний вузол – координатор (рис. 1.10).

Кластер являє собою групу вузлів, які формують систему по топології типу «зірка». В ієрархічній кластеризованій системі різномірні сенсори (рис. 1.9 в) передають дані до координатора, який відповідає за зберігання даних в концентраторі пам'яті. У концентраторі пам'яті тимчасово зберігаються дані вимірювань, інформація про позиціонування й профілі кожного сенсора в системі, а також здійснюється первинна обробка даних. Зібрану інформацію координатор передає через зовнішній шлюз до центру обробки даних [32].

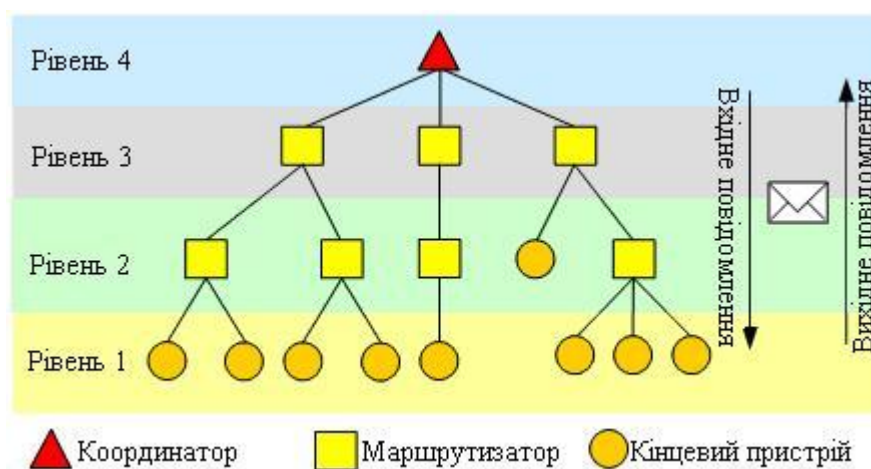


Рис. 1.5. Структура ієрархічної чотирьохрівневої сенсорної системи

Ієрархічна архітектура БСМ характеризується централізованою обробкою інформації та програмованими джерелами, що підвищують надійність передачі інформації, вибірковість в топології і масштабованість системи. На рис. 1.10 наведено приклад БСМ чотирьохрівневої ієрархії [6].

У цій архітектурі нижній рівень складається з неповнофункціональних кінцевих вузлів, функція яких полягає в зборі достовірної інформації та передачі її без втрати даних на більш високий рівень.

Другий рівень призначений для агрегування висхідних потоків, надійної передачі інформації до третього рівня і маршрутизації даних. Також можлива наявність на цьому рівні пристроїв FFD як кінцевих вузлів, а в критичних ситуаціях вони виступають як резервні маршрутизатори для підвищення вибірковості та надійності системи. Маршрутизатори на другому рівні витягують необхідну інформацію про підключені кінцеві вузли: ідентифікатори та координати їх системи.

До третього рівня належать координатор і базові станції, які відповідають за самоорганізацію БСМ, передачу інформації від кінцевих вузлів до ЦОД у зовнішню мережу, а також забезпечують необхідну якість передачі інформації. На другому і вищих рівнях для передачі інформації від різних джерел потоки об'єднуються в один потік, при цьому в критичних ситуаціях інтенсивність і обсяг переданих даних різко зростає, що може призвести до перевантаження, погіршення якості обслуговування або відмови системи. Тому на рівнях, що агрегують кілька потоків, крім передбачених методів доступу, що обмежують інтенсивності джерел, також необхідним є механізми обмеження трафіка і запобігання перевантаження системи. При відсутності функціональної необхідності кожний з рівнів може бути опущений.

Гібридна система об'єднує в собі принцип децентралізованої та ієрархічної побудови, в якому на двох нижніх рівнях може бути організована децентралізована структура кластерів. Гібридна архітектура має значні плюси по масштабованості системи, вона забезпечує такі переваги:

- низьку вартість;
- більше покриття;
- більш високі функціональні можливості;
- більш високу надійність.

Пристрої FFD вимагають велику потужність і додаткові ресурси [30, 36].

З практичної точки зору серед гібридних систем найбільший інтерес представляють топології типу «кластерне дерево» (рис. 1.9в) або «багатокоміркова мережа» (рис. 1.9г). Топологія «кластерне дерево» є множиною об'єднаних мереж типу «зірка», в вершинах яких знаходяться вузли-маршрутизатори, і присутній один координатор кластеру. Мережі цього типу мають низьку стійкість до відмов та змін в топології, оскільки маршрутизатори забезпечують вибірковість шляхів і самоорганізацію мережі. Взаємодія децентралізованої, ієрархічної та гібридної сенсорних мереж дозволяє розширювати радіуси дії мереж.

Таким чином, при виборі структури БСМ слід враховувати необхідну дальність зв'язку, кількість сенсорів на обслуговуваній території, необхідний рівень якості обслуговування, кількість потоків інформації і обсяг переданих даних. Так, для забезпечення в одній кімнаті постійних кліматичних умов достатньо використовувати систему типу «точка-точка» з одним або двома пристроями FFD. А при створенні в медичному відділенні загальної системи збору інформації краще застосувати багатокоміркову структуру системи, тоді в кожному кабінеті можна створювати кілька мереж типу «зірка» для зняття вимірів окремих пацієнтів і передавати дані об'єднаним потоком до центру зберігання даних.

1.4. Класифікація безпроводових мереж за масштабом дії

Класифікація БСМ (рис.1.6) за масштабом дії передбачає розділення на:

- персональні (Personal Area Network, PAN);
- локальні (Local Area Network, LAN);
- міські (Metropolitan Area Network, MAN);
- глобальні мережі (Wide Area Network, WAN) [31].

На рис. 1.6 наочно продемонстровано масштаби дії персональних, локальних, міських та глобальних мереж.

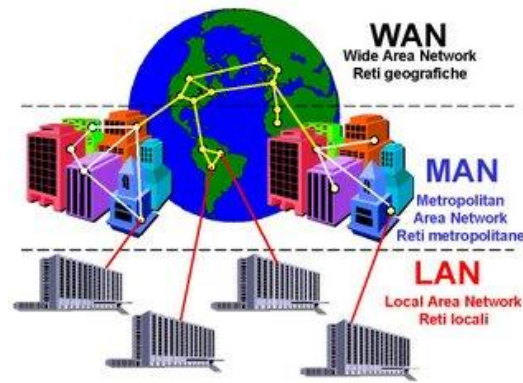


Рис 1.6. Класифікація телекомунікаційних мереж за масштабом дії

Персональні мережі забезпечують інтервал зв'язку між двома користувачами від 10 м до 100 м. При використанні ієрархічної структури побудови БСМ мережні вузли РАН належать до нижніх рівнів: першого, а при розширенні мережі – другого рівня. Прикладами таких мереж можуть слугувати мережі, які використовуються у медицині катастроф – повне обстеження організму людини, комплексне вимірювання параметрів: тиску, температури, кардіограми і ін. [34]. Очевидно, що за допомогою однієї передачі даних з контрольованого об'єкту не вдається отримати достовірну інформацію на центральному вузлі. Велику інформативність несе мультимедійна передача мови, а в деяких випадках відео. Таким чином, контентом БСМ можуть бути як дані, так і мультимедійна інформація та передача мови, що вимагає високошвидкісних каналів.

Міські мережі – мережі, радіус дії яких від сотень метрів до декількох десятків кілометрів. Сенсорні міські мережі (MAN-SN) являють собою об'єднання декількох локальних мереж в межах міста і здатні передавати тільки об'єднані потоки, тобто вони призначені виконувати функції верхнього рівня ієрархії, або ж можуть представляти окрему мережу, кінцеві вузли і маршрутизатори якої розміщені по всьому місту, а сама БСМ охоплює всі рівні ієрархії. MAN-SN і WAN-SN інтегрують в собі потоки інформації, які агрегуються від персональних і локальних мереж, передають інформацію на великі відстані.

1.5. Операційна система

Для виконання функцій на кожен мот встановлюється спеціалізована операційна система. В даний час в більшості безпроводових сенсорних мереж використовується TinyOS - ОС, розроблена в Університеті Берклі. TinyOS відноситься до програмного забезпечення з відкритим кодом.

Найважливішим фактором при роботі безпроводових сенсорних мереж є обмежена ємність батарей, що встановлюються на моти. Слід враховувати, що замінити батареї найчастіше неможливо. У зв'язку з цим необхідно виконувати на мотах тільки найпростішу первинну обробку, орієнтовану на зменшення обсягу інформації, що передається, і, що найголовніше, мінімізувати число циклів прийому і передачі даних. Для вирішення цього завдання розроблені спеціальні комунікаційні протоколи, найбільш відомими з яких є протоколи альянсу ZigBee.

Для вироблення стандарту, в тому числі стека протоколів для безпроводових сенсорних мереж, ZigBee використовував розроблений раніше стандарт IEEE 802.15.4, який описує фізичний рівень і рівень доступу до середовища для безпроводових мереж передачі даних на невеликі відстані (до 75 м) з низьким енергоспоживанням, але з високим ступенем надійності.

На даний момент ZigBee розробив єдиний в цій області стандарт, який підкріплений наявністю виробництва повністю сумісних апаратних і програмних продуктів. Протоколи ZigBee дозволяють пристроям перебувати в сплячому режимі більшу частину часу, що значно подовжує термін служби батареї.

1.6. Технічні обмеження та складнощі реалізації

У той час як сенсорні мережі мають багато спільних проблем з іншими розподіленими системами, вони володіють різними унікальними складнощами і обмеженнями. Ці обмеження впливають на конструкцію БСМ, що вимагає особливих протоколів і алгоритмів, які відрізняються від своїх аналогів в інших розподілених системах.

У БСМ обмеження найчастіше пов'язані з тим фактом, що сенсорні вузли працюють з обмеженим запасом енергії. Як правило, вони розраховані на живлення від акумуляторів, які повинні бути замінені або заряджені (наприклад, з використанням сонячної енергії) після розрядки. Для деяких вузлів жоден з варіантів не підходить. В такому випадку вони будуть просто відкинуті, як тільки їх джерело енергії буде вичерпано. Можливість заряду акумулятора істотно впливає на стратегії споживання енергії для виконання збору і передачі інформації. Для одноразових батарей, сенсорний вузол повинен бути здатний працювати або до закінчення часу його місії, або до моменту, коли батарея може бути замінена. Тривалість часу експлуатації, залежить від типу програми. Наприклад, науковий моніторинг руху льодовиків, можливо, зажадає датчиків, які працюють протягом декількох років, а датчики в разі військових дій можуть бути необхідні тільки протягом декількох годин або днів.

Для систем, які використовують сенсорні мережі, типовими обмеженнями є робота у віддалених районах і суворих умовах, без підтримки інфраструктури або можливості обслуговування та ремонту. Таким чином, сенсорні вузли повинні мати здатності до самоорганізації і самокерування щодо налаштування власних параметрів, взаємодії з іншими вузлами, адаптації до збоїв, змін навколишнього середовища, а також зміни факторів, які впливають на навколишнє середовище, без втручання людини.

Багато сенсорних мереж після розгортання повинні працювати без втручання людини, тобто настройка, адаптація, обслуговування та ремонт повинні виконуватися в автономному режимі. (Serpa and Estrin 2004)

Оптимізація відноситься до здатності пристрою робити моніторинг і оптимізацію використання власних ресурсів. Самозахист дозволяє пристрою розпізнавати і протидіяти вторгненням і атакам. Нарешті, здатність самостійно відновлюватися дозволяє сенсорним вузлам виявляти, ідентифікувати і реагувати на мережеві збої. В енергетично обмежених сенсорних мережах всі ці функції

самоорганізації повинні бути розроблені та впроваджені таким чином, щоб вони не викликали значних додаткових витрат енергії.

Також необхідно враховувати, що ослаблення обмежує дальність поширення радіосигналів: радіочастотний (РЧ) сигнал зникає (тобто зменшується в силі), поки він поширюється через середовище і в той час, коли він проходить через перешкоди. Співвідношення між прийнятою потужністю і потужністю, що передається радіочастотного сигналу може бути виражене за допомогою закону обернених квадратів:

$$P_r \propto \frac{P_t}{d^2} \quad (1.1)$$

який говорить, що потужність, що приймається – P_r , пропорційна зворотній величині квадрату відстані d від джерела сигналу.

Потреба в невеликому форм-факторі і низьке споживання енергії також забороняє інтеграції багатьох бажаних компонентів, наприклад, GPS приймачів.

1.7. Відмінності безпроводових сенсорних мереж від традиційних

З вищевикладеного зрозуміло, що багато рішень в розробці БСМ відрізняються від проектних рішень інших систем і мереж. У таблиці 1.1 наведені деякі ключові відмінності між традиційними мережами і БСМ. Ряд додаткових проблем може впливати на конструкцію сенсорних вузлів і безпроводових сенсорних мереж. Наприклад, деякі датчики можуть бути встановлені на рухомих об'єктах, таких як транспортні засоби або роботи, що призводить до безперервного зміни топології мережі. В таких системах потрібна оперативна адаптація на декількох рівнях.

Таблиця 1.1 Порівняння традиційних мереж і БСМ

Традиційні мережі	Безпроводові сенсорні мережі
Загальноцільові; багато додатків	Одноцільові; обслуговують один додаток
Типові обмеження відносяться до пропускнув здатності і затримкам; споживання енергії не розглядається	Споживання енергії – головний обмежувачий фактор при проектуванні вузлів і мережі в цілому
Мережа розбивається згідно плану	Розгортання мережі, її структура і ресурси, як правило, визначаються на місці (ad-hoc)
Пристрої і мережа працюють в контрольованому і сприятливому середовищі	Сенсорні мережі часто працюють в "агресивному" середовищі
Підтримка і ремонт є типовою, компоненти мережі легкодоступні	Фізичний доступ до компонентів мережі часто ускладнений, або взагалі неможливий
Компоненти, що вийшли з ладу, ремонтуються і відновлюються	Відмова компонентів передбачена і компенсується за рахунок побудови мережі
Отримання повних відомостей по мережі можливе і централізоване управління здійснене	Більшість рішень приймається без центрального керуючого вузла

1.8. Енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах

Більшість сенсорів є мобільними пристроями з вбудованими джерелами енергії. Тому одним з факторів тривалості функціонування вузла є його енергозбереження. Використання енергії вузлів суттєво залежить від режимів роботи підсистеми датчиків. Зростанню енергоспоживання в БСМ сприяють наступні фактори:

- колізії, які передбачають додаткові передачі пакетів;
- «підслуховування», коли вузли приймають пакети, які їм не адресовані;
- витрати протоколів більш високого рівня на передачу службової інформації, які можуть досягати 70 % глобального трафіка [25];
- передача пакетів в час, коли вузол-адресат не готовий до прийому;

- розмір пакетів;
- флуктуації трафіка: різке збільшення глобального трафіку в системі може призвести до значного збільшення кількості колізій.

Для зменшення енерговитрат вузлів необхідно використовувати комплекс методів енергозбереження. Загальна класифікація енергозберігаючих методів в БСМ представлена на рис. 1.7 [35].

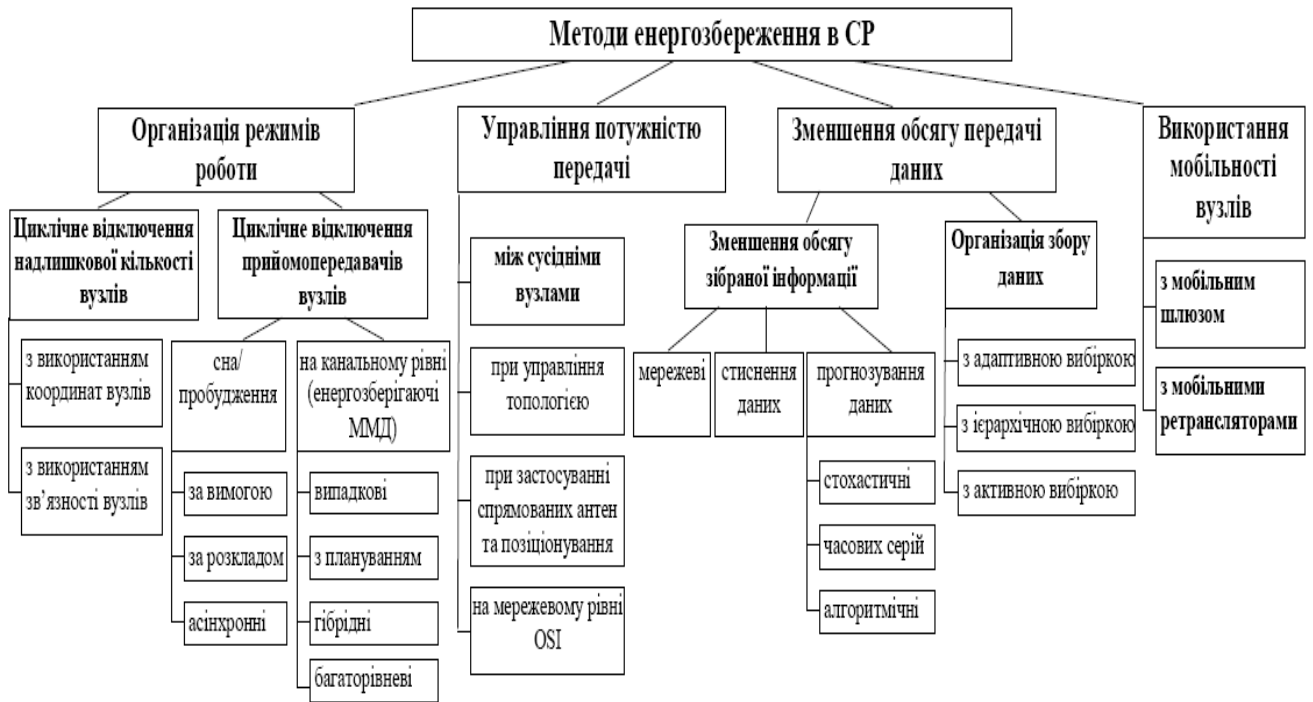


Рис 1.7. Класифікація методів енергозбереження вузлів БСМ

Організація режимів роботи. Енергозберігаючі методи організації режимів роботи спрямовані на зменшення споживання енергетичних ресурсів вузлів безпроводових сенсорних мереж за рахунок періодичного вимкнення вузлів системи. Може застосовуватись метод циклічного відключення надлишкових вузлів на тривалий період часу. Такі вузли зберігають ресурс акумуляторів і майбутньому можуть замінити вузли, які вийшли з ладу або стали неефективними. Основна задача способів даного класу полягає в виборі тих вузлів БСМ, котрі не є критично важливими і на певному циклі роботи мережі можуть бути відключені.

Методи сну/пробудження можуть вмикати прийомопередавачі за розкладом чи вимогою. Методи сну/пробудження за вимогою ефективні в мережах, в яких основний час не здійснюється трансляція інформації. В такій БСМ вузли більшу

частину часу знаходяться в стані відключених прийомопередавачів та гарантованою обмеженою затримкою можливого переходу в стан передачі. Методи сну/пробудження за розкладом пропонують періодичне одночасне включення прийомопередавачів всіх вузлів. Головна перевага цих методів в тому, що якщо вузол передає дані, то гарантовано всі вузли на даний момент знаходяться в режимі прийому. Для даних методів необхідним є використання синхронізації. Одночасний вихід зі сну може привести до одночасної ініціації передачі декількома вузлами, що призведе до колізій, що погано впливає на ефективність та працездатність мережі [35]. Методи даного класу адаптовані до змін топології системи та гнучкі, однак неефективні для мереж низької щільності [26].

Енергозберігаючі методи множинного доступу (МД) можна поділити на методи з плануванням, методи без планування, гібридні та багаторівневі. Основна суть даних методів – застосування переключення різних механізмів доступу в залежності від рівня конкуренції в системі. Так метод Z-MAC [35], на попередньому етапі, за допомогою розподіленого алгоритму розподіляє часові слоти між вузлами сенсорної системи таким чином, щоб в межах двох ретрансляційних ділянок вони не повторювались. Після розподілу кожний вузол має карту розподілу слотів за їх «власниками». На етапі функціонування вузли «не власники» можуть передавати по чужим каналам, якщо виявляють їх низьку завантаженість. При виділенні слота для передачі перевагою користується його «власник» [33].

Управління потужністю передачі. Енергозберігаючі методи управління потужністю передачі спрямовані на забезпечення зменшення споживання енергетичних ресурсів за рахунок зменшення потужності випромінювання антенами окремих вузлів БСМ. Збільшення потужностей передач вузлів приводить до збільшення ймовірності успішної передачі пакетів, скороченню часу їхньої доставки та обсягу службової маршрутної інформації, однак вимагає більшої витрати енергії батарей і визначає високий рівень взаємних перешкод (що приводить до різкого зниження пропускної здатності систем).

Зменшення обсягу передачі даних. Методи зменшення обсягу передачі даних поділяються на два класи. Методи першого класу дозволяють зменшити обсяг вже зібраної вузлами БСМ інформації для її подальшої передачі адресату. Методи другого класу дозволяють організувати енергоефективний збір даних. Застосування цих методів залежить від принципів збору даних в системі та здійснюється відповідно на прикладному рівні.

Використання мобільності вузлів. Методи енергозбереження з використанням мобільності вузлів БСМ дозволяють зменшити кількість ретрансляцій повідомлень при переміщенні вузлів на місцевості [26].

Розглянуті вище за напрямками методи енергозбереження дозволяють зменшити використання енергетичного ресурсу БСМ. Для ефективного енергозбереження необхідно застосовувати сукупність методів в залежності від умов функціонування БСМ.

1.9. Сфери застосування безпроводових сенсорних мереж

Охорона здоров'я: медичні сенсорні мережі [36] можуть бути інтегровані з 3G/4G мультимедійними системами для забезпечення дистанційної роботи служби охорони здоров'я. Пацієнти матимуть медичні сенсори, що контролюватимуть певні параметри: температуру тіла, кров'яний тиск, пульс, кардіограма, тощо. Дистанційні медичні центри зможуть виконувати дистанційний моніторинг пацієнтів через відео- і звукові сенсори, сенсори позиціонування, переміщення або активності.

Екологічний моніторинг та контроль навколишнього середовища: передбачає акустичну і відеопередачу інформації, яка повинна бути передана за короткий проміжок часу. Наприклад, масиви відеосенсорів вже використовуються океанографами, щоб визначити міліну через технології зображення [36].

Моніторинг місцевості: він включає в себе систему охорони й контролю доступу, контроль маршрутів переміщення людей, виявлення аварій на початкових етапах, протипожежну систему. Прикладом можуть бути БСМ, які призначені для охорони нафтогонів, які являють собою сукупність автономних сенсорних модулів, які монтуються над трубопроводом, що охороняється на глибині 50-80 см.

Управління рухом, системи стеження за транспортуванням вантажів: такі системи дозволять контролювати автомобільний рух у великих містах або на магістралях і розвернути службу, яка зможе управляти рухом для уникнення пробок. Інтелектуальна система паркування, що складається з мультимедійних сенсорів [34], дозволить відшукати вільні місця, покращуючи мобільність в міських зонах. Мультимедійні сенсори зможуть здійснювати контроль автомобільних потоків і надавати різну інформацію, наприклад про середню швидкість, кількість автомобілів на дорозі і т. п., а також виявляти порушення правил дорожнього руху.

Моніторинг стану сільськогосподарських угідь: сенсорні мережі можна застосовувати для вирощення різних культур рослин, ведення садівництва та тваринництва. Наприклад, можна розгорнути сенсорну мережу на винограднику і безперервно відстежувати температуру, вологість і інші параметри, важливі для дозрівання кожної лози. Потім можна проаналізувати, яке поєднання погодних умов дає ту або іншу якість вина.

Надзвичайні ситуації: при пожежі на великому складі в промисловій зоні міста безпроводова сенсорна система, розгорнена в будівлі, зможе передати пожежникам докладну інформацію про місцеположення джерела спалаху, характеристики пожежі і причини її виникнення, про можливі шляхи розповсюдження вогню, в деяких випадках допоможе знайти потерпілих та евакуювати їх з місця надзвичайної ситуації.

Системи оборони і забезпечення безпеки, охоронні системи: широкі можливості для застосування у військовій галузі та охороні майна та різноманітних приміщень від несанкціонованого вторгнення та крадіжок.

Контроль систем вентиляції, кондиціонування і освітлення, складський облік: БСМ можуть бути корисними на виробництві для забезпечення норм охорони праці та комфорту працівників, обліку матеріалів на складах тощо.

Висновки до розділу 1

Сенсорні мережі в даний час інтенсивно розвиваються, удосконалюються і є важливою складовою частиною інформаційного суспільства, забезпечуючи моніторинг різних промислових, природних, соціальних та ін. процесів. Вони можуть надавати широкий спектр послуг (від надання даних про значення контрольованого параметра (пасивні датчики) до управління процесами (активні датчики)) та можуть бути використані в багатьох прикладних областях. Еволюцією сенсорних мереж стали безпроводові сенсорні мережі (БСМ) - відсутність проводів уможлиблює їх застосування у важкодоступних місцях або на мобільних об'єктах, що значно розширило коло застосування сенсорних мереж.

На відміну від звичайних, традиційних мереж, БСМ мають певні особливості, переваги та обмеження, пов'язані зі специфікою їх використання та призначення; їх було наведено та розглянуто. Безпроводові сенсорні мережі - це доволі нова перспективна технологія, і багато пов'язаних з нею проектів (наприклад, Інтернет речей IoT), в основному, знаходиться в стадії розробки.

2. ОСОБЛИВОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Проблема синхронізації

У розподілених системах підтримання логічних годинників комп'ютерів таким чином, щоб вони ніколи не мали великих розбіжностей один з одним, є однією з найскладніших проблем комп'ютерної інженерії. Комп'ютерні годинники взагалі мають два компонента, а саме: джерело частоти і засіб накопичення подій синхронізації (що складаються з механізму переривання тактового сигналу і лічильника, реалізованого в програмному забезпеченні). Реалізація комп'ютерних годинників різниться поміж операційними системами і апаратними платформами. Однак основними джерелами помилок синхронізації є некомпенсований кварцовий генератор і генеровані тактові імпульси. Теоретично, два такти будуть синхронізовані, якщо їх зміщення будуть встановлені рівними, а їх джерела частоти будуть працювати з однаковою швидкістю. Однак на практиці годинники встановлюються з обмеженою точністю, а частотні джерела працюють з трохи різними швидкостями. Крім того, частота кварцового генератора змінюється через початкові допуски на виробництво, старіння, температурний режим, тиску та інших факторів. Через ці властиві їм нестійкості розподілені годинники повинні регулярно синхронізуватися.

2.2. Важливість синхронізації

Синхронізація часу - це процедура, яка забезпечує загальне поняття часу в розподіленій системі. Для БСМ важливо виконати ряд фундаментальних операцій, таких як:

- Злиття даних, часове впорядкування повідомлень [2] Для цього потрібно, щоб деякі (або всі) вузли мережі обмінювалися загальним часом. Більшість алгоритмів злиття даних повинні обробляти показники сенсора в момент появи. Тим не менш, велика різниця між затримками повідомлень в сенсорних мережах означає, що повідомлення з розподілених сенсорних вузлів можуть бути прийнятими в приймачі не в тому порядку, в якому вони були відправлені

- Управління живленням. Енергоефективність є ключовим фактором при проектуванні БСМ, оскільки датчики зазвичай залишаються без нагляду і обслуговування після розгортання; заміна батарей протягом їх терміну служби часто буває проблематичною, або і взагалі неможливою. Більшість енергозберігаючих операцій сильно залежать від синхронізації часу. Наприклад, черговий цикл (управління режимами сну і пробудження) допомагає вузлам економити величезні енергетичні ресурси, проводячи мінімальну потужність під час сплячого режиму.

- Планування передачі. Багато протоколів планування вимагають тимчасової синхронізації. Наприклад, схема множинного доступу з часовим поділом (TDMA), одна з найпопулярніших схем зв'язку для розподілених мереж, може бути застосована тільки до синхронізованої мережі.

- Різне. Багато протоколів локалізації, безпеки і відстеження також вимагають, щоб вузли відзначали свої повідомлення та події.

У сенсорних мережах велика кількість вузлів може моніторити одне фізичне явище. Однією з ключових функцій сенсорної мережі є збір результатів цих спостережень в одне ціле. Час є ключовим елементом для об'єднання даних. Наприклад, якщо сенсори можуть виявляти тільки близькість об'єкта, то інформацію більш високого рівня (наприклад, швидкість, розмір) можна отримати шляхом зіставлення даних з декількох вузлів. Швидкість мобільного об'єкту, наприклад, можна оцінити за фактором просторових і часових відстаней між двома послідовними спостереженнями об'єкта різними сенсорними вузлами. Оскільки багато фізичних явищ можуть відбуватися протягом короткого інтервалу часу, одним із завдань сенсорної мережі є поділ сенсорів і їх групування, де кожна група представляє одне фізичне явище. Часові зв'язки між сенсорними вузлами є ключовим елементом для розділення.

Часова координація між сенсорними вузлами також може бути необхідною для забезпечення правильності і послідовності розподілених вимірювань [3].

Таким чином, синхронізація часу є однією з найбільш важливих наукових проблем при проектуванні енергоефективних БСМ.

2.3. Вимоги до синхронізації в БСМ

Існуючих методів хронометражу в БСМ недостатньо по ряду факторів. Сенсорні мережі повинні мати високі показники енергозбереження, тому що для БСМ припускається, що вузли будуть некеровані і матимуть кінцевий запас заряду батареї. Існуючі методи синхронізації часу не беруть до уваги це обмеження. Протоколи, такі як NTP, консервативні у використанні смуги пропускання і неефективні в розглянутому контексті, де пристрої споживають значну кількість електроенергії навіть пасивно прослуховуючи ефір.

Розглянемо деякі показники, які є особливо важливими при постановці вимог до синхронізації в безпроводових сенсорних мережах:

- точність, під якою розуміють дисперсію в групі вузлів БСМ або максимальне значення помилки порівняно із зовнішніми стандартами;
- термін роботи сенсорного вузла, що може варіюватися від постійної синхронізації, яка триває до тих пір поки мережа працює, до майже миттєвої (корисна, наприклад, якщо вузли мають порівняти час виявлення певної події);
- масштабованість та доступність - набір вузлів, які синхронізовані і повністю охоплюють певний регіон;
- ефективність - часові та енергетичні витрати для досягнення синхронізації;
- вартість і форм-фактор - можуть стати особливо важливими в мережах, які включають тисячі малих автономних сенсорних вузлів.

Всі рішення, що пропонуються в існуючих методах синхронізації часу, є компромісними – жоден метод не є оптимальним в усіх випадках. Наприклад, GPS приймачі користувачів можуть бути синхронізовані з еталоном часу з точністю 200 нс [5]. Проте, GPS пристрої часто не можуть бути використані (наприклад, під водою), а для синхронізації може знадобитися кілька хвилин. У деяких випадках

Також GPS пристрої будуть завеликими та задорогими в порівнянні з сенсорами вузлами.

Доцільно розглянути невелику групу вузлів з малопотужними радіостанціями. Якщо один вузол передає сигнал, інші можуть використовувати цей сигнал в якості опорного для порівняння часу, в який ними отриманий цей сигнал. Синхронізація, що забезпечується таким чином, є локальною для застосування та має обмеження показників точності згідно змінної затримки на радіоприймачах і затримки під час поширення радіохвилі. Цей час синхронізації буде кінцевим, так як годинник вузла буде відхилятися від первісного імпульсу. Проте, імпульс вимагає передачі лише одиночного сигналу, тому є швидким і досить енергоефективним.

До значної економії енергії може привести вилучення дублікатів повідомлень про ту ж подію у групи сусідніх сенсорних вузлів. Для цього події повинні мати часову мітку з точністю того ж порядку, що і частота подій; це можуть бути десятки або сотні мілісекунд. Оскільки дані можуть бути відправлені довгим шляхом через всю мережу, і навіть керуватись проміжними вузлами, синхронізація повинна бути всеохоплюючою і мати великий час життя.

Як і в провідному середовищі, синхронізація часу в БСМ схильна до проблем, таким як глюки годинників і різні зміщення годинників у зв'язку зі змінами температури і вологості. Проте, протоколи синхронізації часу для сенсорних мереж повинні враховувати цілий ряд додаткових проблем і труднощів, які будуть розглянуті в наступному розділі. Кілька унікальних характеристик БСМ часто виключають використання існуючих методів синхронізації в цій області.

2.3.1. Врахування впливу зовнішніх умов

Швидкість зміщення годин може відрізнитися з коливаннями температури, тиску і вологості навколишнього середовища. У той час, як типові провідні комп'ютери працюють в досить стабільних умовах (наприклад, в кондиціонованих приміщеннях або офісах), безпроводові датчики найчастіше розташовані на вулицях і в агресивних умовах, де поширені ці коливання у властивостях оточення.

У контрольованих умовах, частота осцилятора варіюється до 3 мд (відхилення в 1 мд становить помилку близько 1 секунди кожні 12 днів) у зв'язку зі змінами температури в кімнаті які були зареєстровані (Mills 1998). Для недорогих сенсорних вузлів, що працюють на вулиці, ці варіації, швидше за все, будуть набагато сильнішими.

2.3.2. Енергетичні обмеження

Безпроводові сенсорні вузли, як правило, функціонують від скінченних джерел енергії, тобто або одноразових, або батарей з можливістю підзарядки (наприклад, за допомогою сонячних панелей). Заміна батареї може істотно здорожити БСМ, особливо коли вузли знаходяться у важкодоступних для обслуговування місцях. Таким чином, протоколи синхронізації часу не повинні вносити істотний внесок в енергоспоживання безпроводових вузлів для забезпечення довгострокової служби батареї. Так як зв'язок між сенсорними вузлами, як правило, є підставою для синхронізації часу, енергоефективні протоколи синхронізації часу повинні прагнути до мінімальної суми найменших повідомлень, необхідних для отримання синхронізації вузлів.

2.3.3. Безпроводове середовище та мобільність

Середовище безпроводового зв'язку, як відомо, непередбачуване і схильне до коливань в продуктивності, через зміни в характеристиках навколишнього середовища, викликаних дощами, туманом, вітром і температурою (Otero et al.2001) Ці коливання погіршують обмеження пропускну здатності мережі, кількість помилок і безпроводових радіоперешкод, які відчують безпроводові сенсорні вузли. Обмін повідомленнями між вузлами може бути додатково утруднений при асиметричних безпроводових каналах зв'язку, тобто вузол А може отримувати повідомлення вузла В, в той час, як повідомлення вузла А надто слабкі для правильної інтерпретації в вузлі В. Загалом, канал зв'язку від сенсорного вузла А до вузла В може мати відчутні відмінності від характеристик (затримки) каналу від вузла В до вузла А, що є причиною асиметричних затримок зв'язку. Крім того, перешкоди зв'язку в безпроводових мережах залежать від щільності мережі,

діапазонах зв'язку і перешкод безпроводових пристроїв і рівня активності цих пристроїв. Численні безпроводові датчики мобільні (наприклад, встановлені на транспортних засобах або переносяться людьми), тим самим викликають значні і швидкі зміни в топології і якості зв'язку. Нарешті, сенсорні вузли можуть вийти з ладу або вичерпати свої батареї, вимагаючи синхронізації часу, яка продовжувала б функціонувати, навіть коли топологія або щільність мережі змінилася. Загалом, наслідком цих проблем є те, що протоколи синхронізації часу повинні розроблятися надійними і реконфігурованими.

2.3.4. Інші обмеження

Крім енергетичних обмежень, недорогі і малопотужні сенсорні вузли часто обмежені в швидкості процесора і пам'яті, вимагаючи, щоб протоколи синхронізації часу були легкими. Невеликий розмір і вартість сенсорних пристроїв унеможлиблює використання великого і дорогого апаратного забезпечення для досягнення синхронізації (наприклад, GPS-приймачі). Тому протоколи синхронізації часу повинні бути розроблені для роботи в умовах обмежених ресурсів, з невеликим, або без збільшення загальної вартості, сенсорним пристроєм. Розгортання безпроводових сенсорних мереж часто дуже масштабне, і протокол синхронізації повинен добре масштабуватися з ростом числа вузлів або щільності мережі. Нарешті, різні сенсорні додатки будуть мати різні вимоги до точності годин або прецизійності. Наприклад, для додатків, таких як додаток стеження за об'єктом, досить елементарної події і впорядкованості повідомлення (без допомоги зовнішніх еталонних годинників). Проте, необхідна точність повинна знаходитися в інтервалі кількох мікросекунд. З іншого боку, сенсорні мережі, які відстежують пішохідний потік в громадських місцях в певний час доби, зажадають зовнішньої синхронізації, де може бути досить точності в межах секунд.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було поставлено питання проблеми синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах, сформульовано і обгрунтовано важливість цього аспекту функціонування безпроводових сенсорних систем. Для повноцінного застосування БСМ потрібна часова координація, з огляду на багато причин – від ефективного енергоспоживання (синхронний перехід сенсорів з режиму сну в активний режим) до успішного збору інформації (одночасний нагляд за подією декількома сенсорними вузлами) та її передачі на пункт управління тощо. Розглянуто відмінності між звичайними безпроводовими мережами та БСМ та зроблено наголос на особливостях останніх, які унеможливають застосування для них звичайних способів і методів синхронізації часу.

3. РОЗВИТОК СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БСМ НА ОСНОВІ ГОДИННИКІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Годинники в розподілених системах

Перш ніж заглибитися в деталі синхронізації з використанням годинників, варто визначити саме поняття годинника. Комп'ютерний годинник - це електронний пристрій, який враховує коливання в точно обробленому кварцовому кристалі з певною частотою. Він також визначається як сукупність апаратних і програмних компонентів, що використовуються для забезпечення точної, стабільної і надійної функції часу доби для операційної системи і її клієнтів. Комп'ютери - це по суті таймери. Таймер підраховує коливання кристала, пов'язані з регістрами лічильника і регістром утримання. Для кожного коливання в кристалі лічильник зменшується на одиницю. Коли лічильник стає рівним нулю, генерується переривання, і лічильник перезавантажується з регістра зберігання. Кожне переривання збільшує програмний годинник (інший лічильник), який може бути прочитаний і використаний додатками, що використовують відповідний інтерфейс програмування додатків (API). Отже, можна запрограмувати таймер для генерації переривання 60 разів на хвилину, встановивши відповідне значення в регістрі зберігання. При кожному такті синхронізації процедура переривання збільшує значення часу, збережене в пам'яті. Значення годинників можна масштабувати, щоб отримати час доби; результат можна використовувати для оцінки часу події на цьому комп'ютері. На практиці кристали кварцу в кожній з машин в розподіленій системі працюватимуть на кількох різних частотах, в результаті чого значення годинників поступово розходяться один від одного. Ця розбіжність формально називається зміщенням годинників, що може призвести до суперечливого уявлення про час. Синхронізація годинників виконується для корекції цього часового перекосу в розподілених системах.

3.2 Необхідні визначення

Надалі нам потрібні будуть наступні визначення. Наведемо їх на прикладі будь-яких двох годинників C_a і C_b .

Час: час годинника задається функцією $C(t)$, де $C(t) = t$ для ідеального годинника.

Частота: частота – це швидкість, з якою годинник прогресує. Частота в момент t годинника C_a складає $C'_a(t)$.

Зміщення: зміщення годинника - це різниця між часом, повідомленим годинником, і реальним часом. Зміщення годинника C_a задається як $C_a(t) - t$. Зміщення годинника C_a відносно C_b в момент часу $t \geq 0$ задається як $C_a(t) - C_b(t)$.

Перекіс: перекіс годинників – це різниця в частотах між наявними та ідеальними годинниками. Перекіс годинника C_a відносно годинника C_b в момент часу t виражається як $(C'_a(t) - C'_b(t))$.

Дрейф: дрейф годинника C_a - друга похідна від значення годинника по часу, а саме C''_a . Дрейф годинника C_a відносно годинника C_b в момент часу t рівен $(C''_a(t) - C''_b(t))$

Частота генератора і порогове значення визначають роздільну здатність годинника. В ідеалі годинник сенсорного вузла повинен бути сконфігурований таким чином, щоб $C(t) = t$, де t позначає ідеальний, або опорний час. Однак, через недеосконалість тактового генератора функція годинника i -го вузла моделюється як $C_i(t) = \varphi + \omega t + \epsilon$ (3.1), де параметри φ і ω називаються зміщенням тактового сигналу (різність фаз) і перекосу годинника (різність частот), відповідно, ϵ означає випадковий шум.

Припускаючи вплив випадкового шуму ϵ (3.1), відношення годинників між двома вузлами, наприклад вузлом 1 і вузлом 2, може бути представлено у вигляді $C_1(t) = \varphi_{12} + \omega_{12}C_2(t)$, (3.2)

де φ_{12} і ω_{12} - відносне зміщення годинника і перекіс між вузлом 1 і вузлом 2 відповідно. Таким чином, $\varphi_{12} = 0$ і $\omega_{12} = 1$, коли два такта відмінно

синхронізовані. Припустимо, що в мережі є L -вузли, тоді глобальна мережева синхронізація досягається, коли $C_i(t) = C_j(t)$ для всіх $i, j = 1, \dots, L$

Синхронізація часу в БСМ є складною проблемою з наступних причин. По-перше, кожен окремий генератор має свої унікальні параметри синхронізації незалежно від його типу. Наприклад, відповідно до типового кристало-кварцового генератора, котрий зазвичай використовується в сенсорних мережах, частота годинників становить до 40 частин на мільйон (ppm), що означає, що годинники різних вузлів можуть втратити до 40 мс в секунду. Іншими словами, кожен окремий осцилятор може приймати різні параметри перекосу в діапазоні від -20 до 20 ppm.

Слід звернути увагу, що в загальному випадку зрушення годинників ω є залежною від часу випадковою величиною (RV), і є два поняття, які часто використовуються в термінології годинників щодо характеру випадковості, котра залежить від часу і присутня в часових параметрах. Ці концепції називаються короткостроковою і довгостроковою стабільністю. Короткострокова нестабільність обумовлена насамперед факторами навколишнього середовища, наприклад, змінами температури, напругою живлення, тоді як довгострокова нестабільність є наслідком більш тонких ефектів, таких як старіння генератора [9]. Для осциляторів, які використовуються в даний час в мережах датчиків, всі ці параметри майже постійні протягом коротких тимчасових інтервалів [11]. Більш того, загальна потужність шумового процесу занадто мала, щоб бути ефективною в коротких проміжках часу. Тому параметри годинників вважаються постійними протягом даного періоду часу.

Що стосується довгострокової стабільності, то параметри годинників можуть бути змінені через зовнішні впливи, такі як температура, атмосферний тиск, зміни напруги і апаратне старіння [11]. Отже, в загальному випадку відносне зміщення годинників продовжує змінюватися з часом, а це означає, що мережа повинна виконувати періодичну ресинхронізацію часу для настройки параметрів синхронізації.

3.3 Неточності годинників

Найчастіше апаратне забезпечення годинників не дуже точне, тому що частота, яка збільшує час, ніколи не буде правильною. Навіть відхилення частоти всього 0,001% призведе до помилки в годиннику близько однієї секунди в день. Це також є причиною того, що частоту годинників часто вимірюють дуже тонкі одиниці, такі як один PPM (Part Per Million).

Тактова частота вказує на частоту, з якою йде годинник, а розфазування синхронізуючих імпульсів - це різниця в частотах двох годинників. Ідеальний годинник, в будь-який час, має тактову частоту, $\frac{dc}{dt} = 1$, але різні параметри впливають на фактичну тактову частоту. Наприклад, температура і вологість навколишнього середовища, напруга живлення і вік кварцу. Це фактори призводять до швидкості відхилення, яка виражає швидкість, з якою два годинники можуть відхилятися один від одного, тобто, $\frac{dc}{dt} - 1$. Максимальна швидкість відхилення годин виражається як ρ , з типовим значенням для кварцових годин, яке становить від 1 мд до 100 мд (1 мд = 10^{-6}). Це число вказано виробником осцилятора і гарантує, що

$$1 - \rho \leq \frac{dc}{dt} \leq 1 + \rho \quad (3.1)$$

Вираз 3.1 показує, як швидкість відхилення впливає на показання годинників щодо реального часу, що призводить до трьох можливих варіантів годинників: до точних, швидких, або повільних. Ця швидкість відхилення відповідальна за невідповідність в показаннях годинників датчиків, навіть після синхронізації годинників, що призводить до необхідності періодично повторювати процес синхронізації. Припустимо ідентичні годинники, будь-які двоє синхронізованих годинників можуть відхилятися один від одного зі швидкістю не вище $2\rho_{\max}$. Для обмеження відносного зміщення до δ секунд, інтервал ресинхронізації τ_{sync} повинен відповідати вимогам:

$$\tau_{\text{sync}} \leq \frac{\delta}{2\rho_{\max}} \quad (3.2)$$

$C(t)$ повинен бути кусково-безперервним, тобто строго монотонною функцією часу. Таким чином, коригування годинників повинне застосовуватися поступово, наприклад, використовуючи лінійну функцію компенсації, яка змінює нахил локального часу. Наслідки простого стрибка годинників вперед або назад можуть бути значними, наприклад, коли таймер встановлено щоб запустити переривання в певний час, що може ніколи не відбутися на годиннику, який пропускає тіки через процес синхронізації.

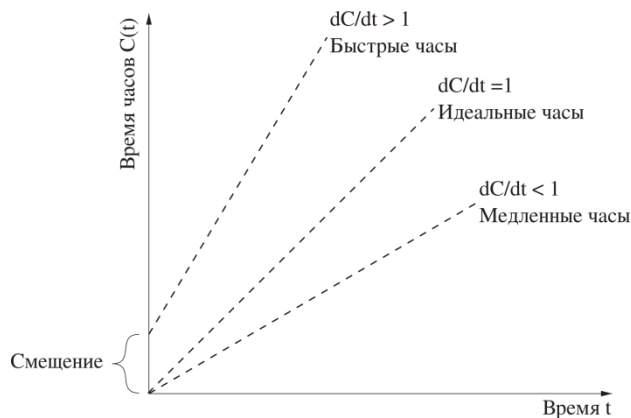


Рис. 3.1 Зв'язок між локальним часом $C(t)$ і реальним часом t .

3.4 Підходи до синхронізації

Загалом, сімейство протоколів, переважно заснованих на методах пакетної синхронізації, призначених для синхронізації годинників у БСМ, може бути в цілому розділене на два основні підходи: синхронізація передавач-приймач (SRS), [2] і приймач-приймач синхронізація (RRS), див.[9]. SRS спирається на традиційну модель двосторонніх обмінів повідомленнями між двома вузлами. Для RRS вузли, які повинні бути синхронізовані, спочатку приймають пакет маяків від загального відправника, а потім порівнюють час прийому пакета маякового радіосигналу для обчислення відносних зсувів годинників. Більшість існуючих протоколів синхронізації часу засновані на одній з цих двох концепцій. Наприклад, NTP [1] і TPSN [2] приймають SRS, оскільки вони залежать від серії парних синхронізацій, які передбачають обмін повідомленнями в режимі двосторонньої синхронізації. Також необхідно звернути увагу на те, що протокол RBS покладається на RRS,

оскільки для компенсації їх відносних зсувів годинників потрібен обмін парою повідомлень між дочірніми вузлами.

Також було запропоновано новий підхід до синхронізації часу, званий синхронізацією тільки з приймачем (ROS). Метою ROS є мінімізація кількості необхідних повідомлень часу і споживання енергії під час синхронізації при збереженні високого рівня точності [12]. Цей підхід може бути використаний для забезпечення мережевої синхронізації з багатьма меншими тимчасовими повідомленнями, ніж інші відомі протоколи, такі як TPSN і RBS.

Синхронізація, як правило, ґрунтується на якомусь вигляді обміну повідомленнями між сенсорними вузлами. Якщо середовище підтримує ширококомовлення (як у випадку з безпроводовими системами), безліч пристроїв можуть бути одночасно синхронізовані з низькою кількістю повідомлень. У цьому розділі обговорюються концепції, що лежать в основі більшості методів синхронізації.

3.4.1 Метод дистанційного зчитування годинників

Синхронізація годинників між будь-якими двома вузлами зазвичай здійснюється за допомогою обміну повідомленнями, які дозволяють одному з вузлів оцінювати час в годиннику іншого вузла. Як тільки різниця часу між годинниками вузлів обчислюється, годинники можуть бути скориговані або налаштовані так, щоб працювати в тандемі. При наявності недетермінованих і необмежених затримок повідомлення можуть затримуватися довільно, що ускладнює синхронізацію. Ефективність протоколу синхронізації зосереджується навколо його здатності запобігати затримкам недетермінованого повідомлення і впливати на якість синхронізації.

Cristian визначив метод читання віддалених годинників, який обробляє необмежені затримки повідомлень між процесами [17]. Коли процес хоче оцінити час віддаленого процесу, він відправляє запит часу і чекає на відповідь даного віддаленого процесу. Коли він її отримує, процес обчислює круговий рух як різницю між часом, в який він ініціював запит, і часом, в який було отримано

відповідь. Відповідь містить оцінку часу на віддаленому процесі. Отримавши таку відповідь, він коригує свій локальний годинник на суму оцінки і половину часу проходження. Виконується декілька спроб, тому що затримка передачі не є детермінованою, і вибирається спроба, яка пропонує найменший час проходження в обидва кінці;

Метод Cristian синхронізує кілька клієнтів з точним часом (Universal Coordinated Time), використовуючи метод віддаленого читання годинників, як показано на малюнку 3.2.

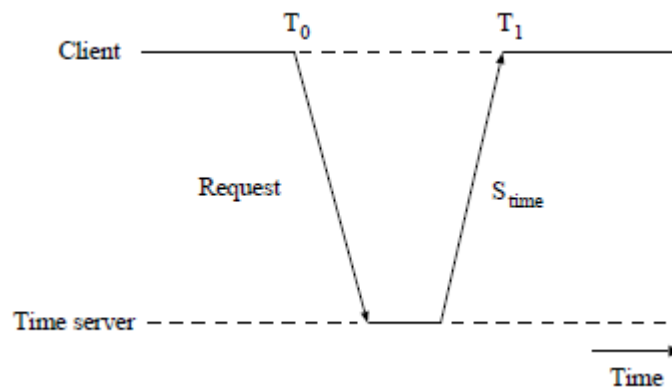


Рис. 3.2 Дистанційне зчитування годинників

- Клієнт відправляє повідомлення серверу, який подає запит на отримання мітки часу. Нехай це повідомлення буде ініційовано в момент часу T_0 локально для клієнта.
- Потім сервер повертає повідомлення, що містить мітку часу (S_{time}). S_{time} - це місцевий час на сервері.
- Клієнт отримує це повідомлення у свій місцевий час, скажімо, T_1 .
- Потім клієнт встановлює час на S_{time} (точний час з сервера) + $(T_1 - T_0) / 2$ (час, необхідний для передачі повідомлення).
- Щоб забезпечити точність, виконується кілька раундів, і використовується середнє значення або використовується найкоротший шлях.

Недоліки. Недолік протоколу Cristian полягає в тому, що час для будь-якого повідомлення, що відправляється, сильно варіюється через мережевий трафік і маршрутизацію повідомлень. Ці фактори не тільки важко точно виміряти, але вони

також і непередбачувані. Цей протокол також викликає високу складність з точки зору кількості обмінів повідомленнями, і немає ніяких остаточних засобів для визначення того, скільки випробувань повинно бути виконано для досягнення точної оцінки часу в обидва кінці.

3.4.2 Односторонній обмін повідомленнями

Більшість існуючих протоколів синхронізації часу засновані на попарній синхронізації, при якій два вузла синхронізують свої годинники, використовуючи, щонайменше, одне синхронізаційне повідомлення. Загальномержева синхронізація може бути досягнута шляхом повторення цього процесу між безліччю пар вузлів, до тих пір, поки кожен вузол в мережі не відрегулює свій годинник.

Найпростіший підхід попарної синхронізації виникає, коли тільки одне повідомлення використовується для синхронізації двох вузлів, тобто один вузол відправляє тимчасовий ярлик іншому вузлу, що проілюстровано в лівій графі рис. 3.3. Тут вузол i відправляє синхронізаційне повідомлення вузлу j в момент часу t_1 , вбудовуючи t_1 як тимчасовий ярлик в повідомлення. Після отримання цього повідомлення, вузол j отримує тимчасовий ярлик t_2 від свого локального годинника. Різниця між двома часовими ярликами є показником зміщення годинників (між годинниками вузла i і вузла j), котрий позначається як δ . Більш точно різниця між двома часами виражається таким чином:

$$(t_2 - t_1) = D + \delta \quad (3.3)$$

де D - це невідомий час проходження. Час проходження в безпроводовому середовищі дуже незначний (декілька мікросекунд) і часто ігнорується, або передбачається деякою постійною величиною. Слід звернути увагу, що використовуючи цей підхід, вузол j може обчислити зміщення і налаштувати свій годинник відповідно до годинника вузла i .

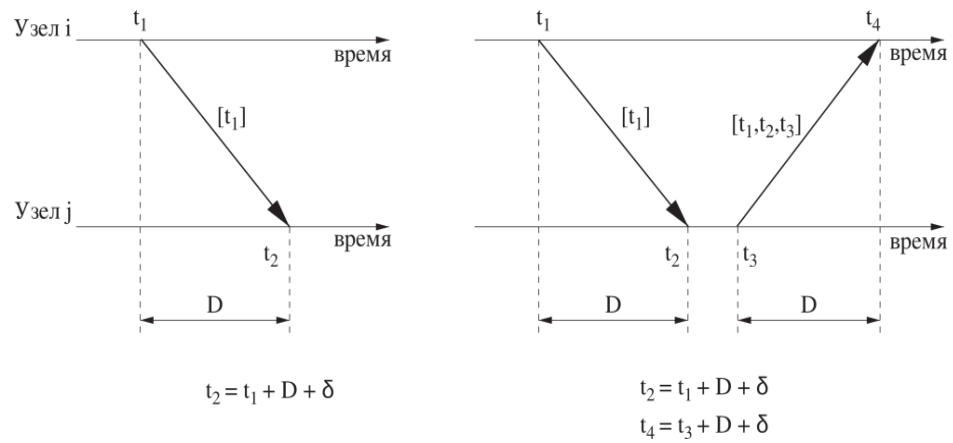


Рис. 3.3 Концепція попарної синхронізації.

3.4.3 Двосторонній обмін повідомленнями

Дещо більш точний підхід полягає у використанні двох синхронізаційних повідомлень як показано в правій графі на рис.3.3. Тут вузол j відповідає повідомленням, виданим в момент часу t_3 , що містять тимчасові ярлики t_1 , t_2 і t_3 . Після отримання цього другого повідомлення в момент часу t_4 , обидва вузли можуть визначити зміщення годинників, знову припускаючи фіксоване значення для затримки проходження. Однак, вузол i тепер здатний більш точно визначити як затримку проходження, так і зміщення:

$$D = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (3.4)$$

$$offset = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad [29] \quad (3.5)$$

Відзначимо, що це передбачає, що затримка проходження ідентична в обох напрямках, а зміщення годинників не змінюється між обчисленнями (що можливо завдяки короткому проміжку часу). Поки тільки вузол i має достатньо інформації, щоб визначити зміщення, вузол i може розповсюдити значення зміщення вузлу j в третьому повідомленні.

3.4.4 Приймач-приймач синхронізація (RRS)

Інший підхід використовується протоколами, які застосовують принцип синхронізації приймач-приймач, де синхронізація заснована на часі, з яким те ж

саме повідомлення надходить на кожен приймач. Це відрізняється від більш традиційного підходу передавач-приймач, від підходу більшості схем синхронізації. У широкомовних середовищах ці приймачі отримують повідомлення приблизно в той же час, а потім обмінюються часом їх отримання для обчислення зсуву (наприклад, різниця в часі прийому вказує на зсув їх годинників). Рис. 3.4 ілюструє приклад такої схеми. При наявності двох приймачів, трьом повідомленнями необхідно синхронізувати обидва приймача. Прикладом такого підходу є протокол RBS. Варто звернути увагу, що широкомовне повідомлення не несе тимчасовий ярлик, а замість нього час приходу широкомовного повідомлення на різні приймачі використовується для синхронізації приймачів один з одним.

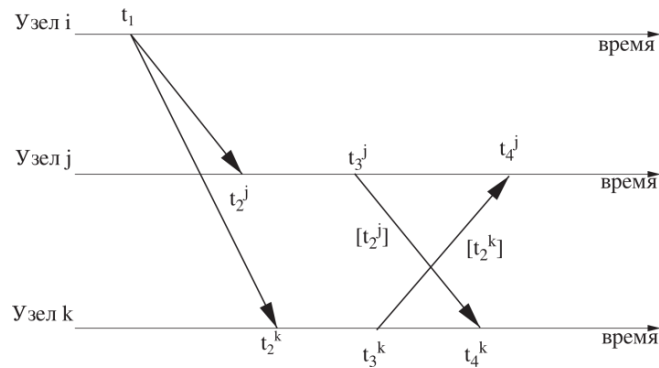


Рис. 3.4 Метод синхронізації приймачів.

Основна перевага цього підходу полягає в тому, що всі компоненти недетермінованої затримки на стороні передавача (час відправлення і час доступу) усуваються. Загалом, цю затримку відчувають синхронізаційні повідомлення, вона являє собою суму з декількох компонентів (Kopetz and Ochsenreiter, 1987), як показано на рисунку 3.5

Таким чином, висока точність синхронізації може бути досягнута з використанням підходу приймач-приймач.

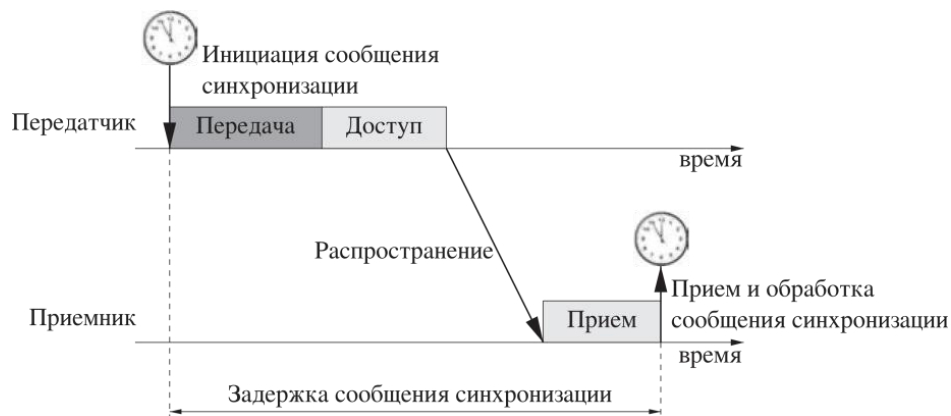


Рис. 3.5 Двостороння затримка при передачі повідомлення синхронізації.

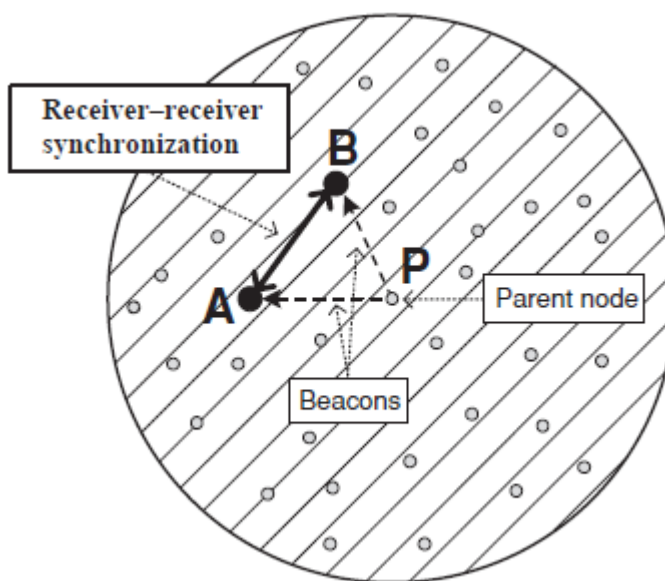


Рис. 3.6 Синхронізація приймач-приймач

3.4.5 Компоненти затримки в доставці повідомлень

Основні завдання синхронізації часу в розподіленій мережі – забезпечити загальну тимчасову шкалу для всіх мережевих вузлів, а також правильну тимчасову координацію між усіма вузлами, які беруть участь в спільній і розподіленій взаємодії з фізичним середовищем. Невідповідність часу виникає в основному з різного часу установки вузлів і тимчасових різниць, що вводяться локальними генераторами, котрі працюють на різних частотах. Зміни навколишнього середовища, такі як температура, старіння, також призводять до непередбачуваного запуску локальних генераторів тактових імпульсів. Всі ці невизначеності змушують локальні годинники різних вузлів дрейфувати протягом

часового інтервалу. Припустимо, що два вузли необхідно синхронізувати один з одним. Один з вузлів відправляє свій поточний час на інший вузол, тобто якщо в доставці повідомлень немає ніякої затримки, цей сусідній вузол відразу дізнається різницю між його годинником і годинником сусіда. На жаль, в реальній безпроводовій мережі різні затримки впливають на доставку повідомлень, що робить синхронізацію часу набагато складнішою, ніж здається на перший погляд. Загалом, для оцінки відносних зсувів часу між вузлами потрібна серія передач тимчасових повідомлень. У деякому роді синхронізація часу в мережах безпроводових датчиків може розглядатися як процес усунення недетермінованих затримок при передачі тимчасових повідомлень по безпроводових каналах. При передачі повідомлень між вузлами існує ряд недетермінованих затримок. Kopetz і Ochsenreiter вперше проаналізували структуру затримок повідомлень і охарактеризували компоненти затримки відповідно до процесу доставки повідомлень [13]. Компоненти затримки в доставці повідомлень можна класифікувати в такий спосіб:

1. Час відправки: час, що витрачається на побудову повідомлення на рівні додатку, включаючи інші затримки, введені операційною системою при обробці запиту відправки. Час відправки не є детермінованим і може становити до сотні мілісекунд, в залежності від робочого навантаження системи.

2. Час доступу: час очікування для доступу до каналу після досягнення рівня MAC. Це найважливіший фактор і сильно варіюється в залежності від конкретного використовуваного протоколу MAC. Час доступу не є детермінованим і варіюється від мілісекунд до секунд, в залежності від поточного мережевого трафіку.

3. Час передачі: час передачі повідомлення на фізичному рівні. Ця затримка може бути оцінена по довжині повідомлення і швидкості радіо в середовищі і складає близько десятків мілісекунд.

4. Час поширення: фактичний час, необхідний для передачі повідомлення від відправника до отримувача по безпроводовому каналу. Час поширення є детермінованим і, як правило, менше 1 мікросекунди, що є майже незначним в

порівнянні з іншими компонентами затримки.

5. Час прийому: час, необхідний для прийому повідомлення на фізичному рівні, яке збігається з часом передачі. У деяких випадках ця затримка була класифікована як частина часу прийому.

6. Час опрацювання після прийому: час, необхідний для створення і відправки прийнятого повідомлення на прикладний рівень в приймачі. Його можна розглядати як компонент на стороні приймача, аналогічний часу відправки на стороні передавача і може змінюватися в часі через змінні затримки, введені операційною системою.

Слід звернути увагу, що час затримки в передачі повідомлень також залежить від інших факторів, таких як апаратна платформа, код виправлення помилок і схема модуляції. Розрахункова тимчасова затримка, що обговорювалася вище в кожному компоненті, заснована на платформі MICA [14].

Багато схем синхронізації для БСМ застосовують техніки нижнього рівня, спрямовані на зниження кількості або зміни деяких цих компонентів. Наприклад, тимчасові ярлики MAC-рівня можуть зменшити затримку відправки і затримку отримання, на відправнику і одержувачі відповідно.

3.4.6 Передавач-приймач синхронізація (SRS)

Цей підхід заснований на класичному двосторонньому механізмі обміну повідомленнями часу між двома сусідніми вузлами. Розглянемо батьківський вузол Р і один з його дочірніх вузлів, вузол А, як показано на малюнку 4.1. Модель годинників для обміну двостороннім повідомленням зображена на малюнку 4.2, де $\varphi^{(AP)}$ позначає зсув тактового сигналу між вузлом А і вузлом Р, і передбачається, що повідомлення синхронізації використовуються для обміну декілька (N) разів [2], [15]. Тут тимчасові мітки, зроблені під час обміну і-м повідомленням $T_{1,i}^{(A)}$ і $T_{4,i}^{(A)}$ вимірюються локальними годинниками вузла А, і $T_{2,i}^{(P)}$ і $T_{3,i}^{(P)}$ вимірюються локальними годинниками вузла Р. Вузол А передає пакет синхронізації, що містить значення тимчасової мітки $T_{1,i}^{(A)}$ на вузол Р. Вузол Р приймає його в момент часу

$T_{2,i}^{(P)}$, і передає пакет підтвердження до вузла А при $T_{3,i}^{(P)}$. Цей пакет містить значення тимчасових міток $T_{1,i}^{(A)}$, $T_{2,i}^{(P)}$ і $T_{3,i}^{(P)}$. Потім вузол А, нарешті, отримує пакет в $T_{4,i}^{(A)}$.

Як обговорювалося раніше, затримки пакетів можна розділити на кілька різних компонентів:

Відправки, доступу, передачі, поширення та отримання часу. Ці компоненти затримки вбудовані в два основних складових елемента: фіксовану частину d і змінну частину X_i . Змінна частина затримок залежить від різних параметрів мережі (наприклад, стану мережі, трафіку і т. д.) і змінних налаштування, і тому не може бути знайдена одна модель затримки для кожного випадку [16]. До сих пір для моделювання випадкових затримок було запропоновано декілька моделей щільності ймовірності, найбільш поширеними з яких є гаусові, гамма-експоненціальні і вейбулові [9]. Гаусова модель затримки підходить, якщо затримки вважаються обчислюваними незалежними випадковими процесами. В [9] критерій хі-квадрат показав, що змінну частину затримок можна моделювати як гаусові розподілені RV з 99,8% впевненістю. Зміщення годинників між двома вузлами зазвичай збільшується через різницю в часових параметрах кожного осцилятора. Тому застосування механізму корекції тактового сигналу збільшує точність синхронізації і гарантує довгострокову надійність синхронізації.

3.4.7 Синхронізація лише приймача (ROS)

Через обмеження потужності діапазон зв'язку датчика строго обмежений (радіогеометричним) колом, радіус якого залежить від потужності передавача (див. рис. 3.7). На цьому рисунку кожен вузол в заштрихованій області (наприклад, вузол В) може приймати повідомлення від вузла Р і вузла А. Припустимо, що вузол Р є батьківським (або опорним) вузлом, а вузол Р і вузол А виконують парну синхронізацію. Використовується обмін повідомленнями з двостороннім обміном часу, як показано на малюнку 3.8. Потім всі вузли в загальній зоні покриття вузла Р і вузла А (заштрихована область) отримують серію повідомлень синхронізації,

що містять інформацію про тимчасові мітки парної синхронізації. Використовуючи цю інформацію, вузол B також може бути синхронізований з батьківським вузлом P без додаткових передач часу. Цей підхід називається синхронізацією тільки приймача (ROS). Загалом, всі сенсорні вузли, що знаходяться в заштрихованій області на малюнку 3.7, можуть бути синхронізовані тільки шляхом прийому повідомлень про час через підхід ROS. Тут вузол P і вузол A можна розглядати як суперноди, оскільки вони забезпечують маяки синхронізації для всіх вузлів, розташованих в їх околиці.

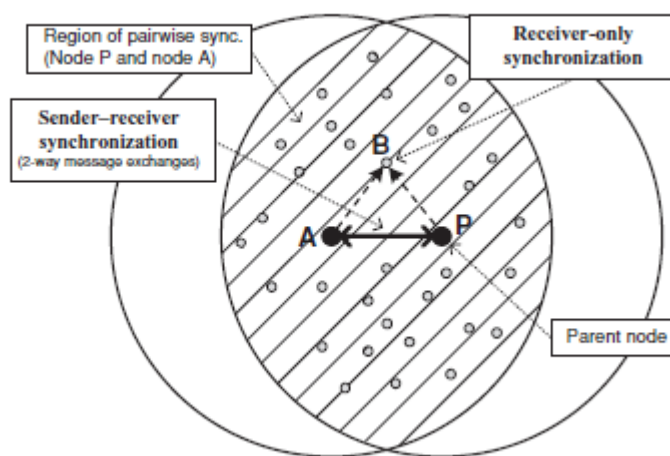


Рис. 3.7 Передавач-приймач синхронізації і лише приймач синхронізація

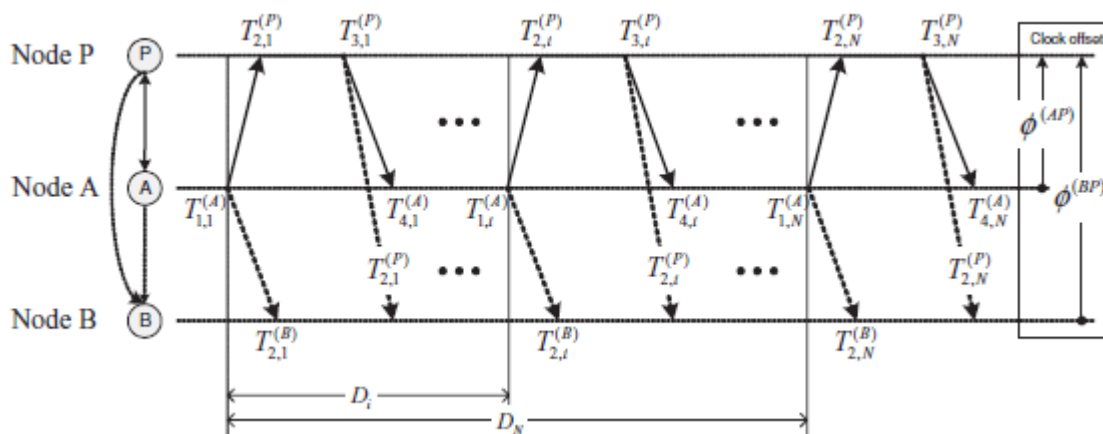


Рис 3.8 Моделі синхронізації ROS та SRS

3.4.8 Порівняльна характеристика SRS, RRS та ROS

SRS може бути безпосередньо відзначений на фізичному рівні для усунення ефектів компонентів затримки, пов'язаних з операційною системою. Отже, це значно знижує невизначеність тимчасових затримок при доставці повідомлень.

Навпаки, RRS видаляє ефект недетермінованих компонентів затримки, таких як час відправлення та доступу, на стороні приймача. Експериментальні результати з використанням платформи Berkeley mote [2] стверджують, що SRS перевершує RRS з точки зору точності синхронізації (помилки) приблизно в 2 рази. Однак таку оцінку можна оскаржувати, оскільки виконання схеми синхронізації залежить від безлічі різних чинників, таких як мережева платформа і настройка, стан каналу і схема оцінки. ROS призначений для мінімізації загального споживання енергії при синхронізації. У цьому підході кілька вузлів датчиків можуть бути синхронізовані без будь-якої передачі повідомлень, тобто вони можуть бути синхронізовані тільки шляхом прийому повідомлень синхронізації між парами вузлів. Хоча немає ніякої вигоди щодо точності синхронізації в порівнянні з іншими підходами, ROS значно знижує загальне споживання енергії в мережі за рахунок зменшення кількості повідомлень синхронізації, необхідних для її досягнення.

3.5 Вимоги до протоколів синхронізації

- Протокол повинен справлятися з ненадійною мережевою передачею і необмеженими затримками повідомлень.
- При синхронізації двох вузлів кожен вузол повинен мати можливість оцінити місцевий час на годиннику іншого вузла. Це не є тривіальною проблемою через нерозв'язані затримки повідомлень між вузлами в розподіленій системі.
- Час ніколи не повинен йти в зворотньому напрямку. Мається на увазі, що годинник повинен поступово просуватися до тих пір, поки не буде досягнута корекція, а не буде безпосередньо повністю відновлена.
- Накладні витрати на синхронізацію не повинні погіршувати продуктивність.

3.6 Класифікація протоколів синхронізації часу

В ідеальному випадку протокол синхронізації часу повинен працювати оптимально з точки зору всіх висунутих вимог, пов'язаних з тимчасовою синхронізацією в БСМ, які включають в себе енергоефективність, масштабованість, точність, безпеку, надійність. Однак складний характер БСМ

дуже ускладнює оптимізацію протоколу щодо всіх цих вимог одночасно. Через компроміси в задоволенні цих вимог кожен протокол призначений для того, щоб чітко розрізняти різні вимоги.

Беручи різні критерії, протоколи синхронізації часу можуть бути класифіковані в різні класи. Розглянемо класифікацію протоколів синхронізації на основі двох видів функцій:

1. Концепції забезпечення синхронізації;
2. Способи синхронізації відповідно до особливостей мереж.

3.6.1 Концепції забезпечення синхронізації

- Підпорядкована (ведучий-ведений) в порівнянні з рівноправною синхронізацією

Підпорядкована (Master-slave). Протокол ведучий-ведений призначає один вузол в якості ведучого, а інші вузли - в якості ведених. Ведені вузли розглядають локальне зчитування годинників ведучого в якості опорного часу і намагаються синхронізуватись з ведучим. Загалом, головний вузол вимагає ресурсів процесора, пропорційних кількості підлеглих пристроїв, а вузлам з потужними процесорами або більш легкими навантаженнями призначається головний вузол. Mock et al. [18] взяли протокол синхронізації годин IEEE 802.11 через свою просту, не надмірну структуру ведучого/веденого. Протокол Ping [19] також дотримується режиму ведучий-ведений.

Рівноправна (Peer-to-peer). Більшість протоколів в літературі, таких як RBS [20], протокол Ромера [10], протокол PalChaudhuri et al. [21], протокол дифузії часу W. Su, I. Akyildiz [22], а протокол асинхронної дифузії Li і Rus [23] заснований на тимчасовій структурі. Будь-який вузол може безпосередньо зв'язуватися з кожним іншим вузлом в мережі. Це усуває ризик збою головного вузла, що запобігатиме подальшій синхронізації. Конфігурації тимчасових вузлів забезпечують більшу гнучкість, але їх також складно контролювати.

- Корекція годинників в порівнянні з некерованими годинниками

Корекція годинників. Більшість методів на практиці виконують синхронізацію, виправляючи локальні годинники в кожному вузлі, щоб працювати нарівні з глобальним тимчасовим масштабом або атомним годинником, які використовуються для забезпечення зручного опорного часу. Протокол Mosk et al. [18] і протокол Ping [19] засновані на цьому методі. Локальні годинники вузлів, які беруть участь в мережі, виправляються або миттєво, або постійно, щоб синхронізувати всю мережу.

Некеровані годинники. Досягнення загального поняття часу без синхронізації стає популярним, тому що завдяки цьому підходу можна зберегти значну кількість енергії. Кожен вузол підтримує свій власний годинник, як є, і зберігає таблицю переведення часу, яка пов'язує його годинник з годинниками інших вузлів; таким чином, замість постійного оновлення свого годинника кожен вузол перетворює інформацію про час в пакети даних, що надходять від інших вузлів, у свій власний годинник, використовуючи таблицю перетворення часу. Місцеві мітки часу порівнюються з використанням таблиці. Таким чином, підтримується глобальний масштаб часу, дозволяючи годинникам працювати без прив'язки. Коли мітки часу обмінюються між вузлами, вони перетворюються в локальні значення годинників приймаючого вузла. Враховуються затримки проходження між двома вузлами і час простою повідомлення. RBS та Romer використовують цей принцип.

- Внутрішня синхронізація в порівнянні з зовнішньою синхронізацією

Внутрішня синхронізація. Внутрішня синхронізація означає, що годинники всіх вузлів синхронізуються один з одним, без підтримки зовнішніх системних годинників. Метою внутрішньої синхронізації є отримання узгодженого уявлення про час на всіх вузлах в мережі, навіть якщо цей час може відрізнитися від будь-яких зовнішніх опорних точок відліку часу. Зовнішня синхронізація забезпечує як синхронізацію із зовнішнім джерелом, так і узгодженість між усіма годинниками в мережі. Коли вузли в мережі синхронізовані з зовнішнім системним годинником, точність годинника означає його максимальне зміщення щодо системного

годинника. Коли вузли в мережі синхронізовані внутрішньо, точність вказує максимальне зміщення між будь-якими двома годинниками в мережі (Kopetz 1997). Відзначимо, що якщо два вузли синхронізовані зовні з точністю Δ , вони також синхронізовані внутрішньо з точністю 2Δ .

Для годинників, які забезпечують тільки внутрішню синхронізацію, лише узгодженість годинників на основі причинності має значення, на відміну від синхронізації по відношенню до фізичного часу. Такі годинники називаються логічними (заснованими на причинності).

Зовнішня синхронізація. Зовнішня синхронізація означає, що годинники всіх вузлів синхронізуються з зовнішнім джерелом часу (або системним годинником). Зовнішній системний годинник синхронізується з точним стандартом реального часу, таким як *всесвітній координований час* (Universal Coordinated Time, UTC). Місцеві годинники датчиків прагнуть налаштувати цей опорний час для синхронізації. Такі протоколи, як NTP, синхронізуються таким чином, тому що зовнішня синхронізація краще підходить для слабкозв'язаних мереж, таких як Інтернет. Більшість протоколів у сенсорних мережах датчиків не виконують зовнішню синхронізацію, якщо додаток не вимагає цього, тому що енергоефективність є першочерговим завданням, і використання зовнішнього джерела часу зазвичай призводить до високих потреб в енергії.

Внутрішня синхронізація зазвичай призводить до більш правильної роботи системи, в той час як зовнішня синхронізація в основному використовується для надання користувачам зручної інформації про контроль часу. Варто звернути увагу, що внутрішня синхронізація може виконуватися в «рівноправному» режимі або в режимі «ведучий-ведений». Зовнішня синхронізація не може виконуватися одноранговим способом; для неї потрібен майстер-вузол, який зв'язується зі службою часу, наприклад GPS, для синхронізації ведених пристроїв і самого себе з контрольним часом.

- Імовірна і детермінована синхронізація

Імовірнісна синхронізація. Цей метод забезпечує вірогідну гарантію на максимальне зміщення такту з ймовірністю відмови, яка може бути обмежена або визначена. Обґрунтування імовірнісного підходу полягає в тому, що детермінований підхід зазвичай змушує протокол синхронізації виконувати більше передач повідомлень і викликає додаткову обробку. У безпроводовому середовищі, де енергії мало, це може бути дуже дорого. Протокол PalChaudhuri et al. - імовірнісна варіація RBS. Arvind [8] визначив імовірнісний протокол для проводових мереж.

Детермінована синхронізація. Arvind визначає детерміновані алгоритми як ті, які гарантують верхню межу зміщення годинників з упевненістю. Більшість алгоритмів в літературі є детермінованими. Протокол Sichitiu і Veerarittiphan [24] зосереджений на детермінованому алгоритмі. RBS і протокол дифузії часу [22] також детерміновані.

- Передавач-приймач синхронізація проти приймач-приймач синхронізації

Більшість існуючих методів синхронізує передавача з приймачем, передаючи поточні значення годинників в якості тимчасових міток. Як наслідок, ці методи уразливі для відхилення в затримці повідомлення. Нові методи, такі як RBS, виконують синхронізацію між приймачами, використовуючи час, в який кожен приймач отримує одне й те саме повідомлення. Такий підхід зменшує критичний за часом шлях, який є контуром повідомлення, яке сприяє недетермінованим помилкам в протоколі.

Синхронізація передавача і приймача. Цей традиційний підхід зазвичай відбувається в три етапи.

1. Вузол передавача періодично відправляє повідомлення з його місцевим часом в якості мітки часу для одержувача.
2. Потім приймач синхронізується з передавачем, використовуючи мітку часу, яку він отримує від відправника.

3. Затримка сполучення між приймачем і одержувачем розраховується шляхом вимірювання загального часу округлення з моменту, коли одержувач запитує тимчасову мітку до моменту отримання відповіді.

Недоліки цього підходу очевидні. Існує різниця в затримці сполучення між передавачем і приймачем. Відхилення пов'язано із затримками в мережі (помітними в мережах з декількома прольотами) і робочим навантаженням в вузлах, які задіяні. Більшість методів обчислюють середню затримку повідомлення після виконання багатьох випробувань, протягом яких вони втрачають точність і додають додаткові накладні витрати. Крім того, необхідно враховувати час, що витрачається передавачем на підготовку і передачу повідомлення, а також час, витрачений приймачем на обробку повідомлення.

Синхронізація приймача з приймачем. Цей підхід використовує властивість фізичного ширококомовного носія, яка заключається в тому, що якщо будь-які два приймача отримують одне й те саме повідомлення при передачі з одним ходом (див. нижче), вони отримують його приблизно в один і той же час. Замість того, щоб взаємодіяти з відправником, приймачі обмінюються часом, в яке вони отримали одне й те саме повідомлення, і обчислюють їх зміщення, засноване на відмінності в часі прийому. Очевидною перевагою є зменшення дисперсії затримки повідомлень. Цей протокол уразливий тільки для затримки поширення для різних приймачів і відмінностей в часі прийому.

- Попарна синхронізація в порівнянні з загальносистемною синхронізацією

Попарна синхронізація: протоколи в першу чергу призначені для синхронізації двох вузлів, хоча зазвичай їх можна розширити, щоб забезпечувати синхронізацію групи вузлів.

Загальносистемна синхронізація: протоколи в першу чергу призначені для синхронізації великої кількості вузлів в мережі.

Таблиця 3.1 Класифікація концепцій забезпечення синхронізації

Протокол	Велучий-ведений чи рівноправна	Завнішня чи внутрішня	Детермінована чи ймовірнісна	Передавач-приймач (SRS) чи приймач-приймач (RRS)	Корекція годинників
RBS	Рівноправна	Обидві	Детермінована	RRS	Ні
Romer	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Ні
Mock et al.	Велучий-ведений	Внутрішня	Детермінована	RRS	Так
Ganeriwal et al.	Велучий-ведений	Обидві	Детермінована	SRS	Так
Ping	Велучий-ведений	Обидві	Детермінована	SRS	Так
PalChaudhuri et al.	Рівноправна	Обидві	Ймовірнісна	RRS	Ні
Sichitiu and Veerarittiphan	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Так
Time-diffusion protocol	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	RRS	Так
Asynchronous diffusion	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Так

3.6.2 Методи синхронізації відповідно до особливостей мереж

- Однострибкові і багатострибкові мережі

Однострибковий зв'язок. В однострибковій мережі вузол датчика може безпосередньо зв'язуватися і обмінюватися повідомленнями з будь-яким іншим датчиком в мережі. Однак багато безпроводових сенсорних мережевих додатків охоплюють кілька доменів або районів. (Вузли всередині сусідства можуть обмінюватися повідомленнями через однострибкову передачу повідомлень.) Мережі часто бувають занадто великими, що виключає можливість, щоб кожен сенсорний вузол міг безпосередньо обмінюватися повідомленнями з кожним іншим вузлом. Протоколи, наприклад, by Mock et al., Ganeriwal et al., Ping і PalChaudhuri et al. засновані на однострибковому зв'язку; проте вони можуть бути розширені для передачі в кілька ходів [28].

Мультистрибковий зв'язок. Потреба в багатострибковому зв'язку виникає через збільшення розмірів безпроводових сенсорних мереж. При таких

налаштуваннях датчики в одному домені взаємодіють з датчиками в іншому домені через проміжний датчик, який може відноситися до обох доменів [20]. Зв'язок також може відбуватися як послідовність переходів через ланцюжок попарно суміжних датчиків. RBS, протокол Ping, протокол PalChaudhuri et al., і Time-diffusion protocol можуть бути відповідним чином розширені, щоб обробляти передачу з декількома переходами.

- Стационарні і мобільні мережі

Мобільність є невід'ємною перевагою безпроводового середовища, але вона викликає більше труднощів у досягненні синхронізації. Це призводить до частих змін топології мережі і вимагає більш надійного протоколу.

Стационарні мережі. У стационарних мережах датчики не переміщуються. Прикладом може служити мережа датчиків для контролю руху транспортного засобу в певній галузі. Для цих сенсорних мереж топологія залишається незмінною після того, як датчики розгорнуті в середовищі. Протоколи, які використовуються RBS, Mock et al., Ganeriwal et al., і PalChaudhuri et al. орієнтовані на наземні лінії.

Мобільні мережі. У мобільній мережі датчики мають можливість переміщення, і вони з'єднуються з іншими датчиками тільки при вході в географічний обхват цих датчиків. Обсяг мобільного датчика - це діапазон зв'язку, до якого він може зв'язуватися і успішно обмінюватися повідомленнями з іншими датчиками. Romer показує необхідність в надійному протоколі, який може обробляти часті зміни топології мережі через мобільності вузлів. Зміна топології часто є проблемою, оскільки вимагає ресинхронізації вузлів і перерахунку околиць або кластерів.

- Підхід на основі MAC-рівня і стандартний підхід

Рівень управління доступом до середовища передачі (MAC) є частиною рівня каналу передачі даних в системі (OSI). Цей рівень відповідає за наступні функції:

- Забезпечення надійності шарів над ним у відношенні з'єднань, встановлених фізичним рівнем.

- Запобігання колізій передачі, щоб передача сполучення між одним відправником і передбачуваним вузлом (-ами) приймача не заважала передачі іншими вузлами.

Еталонна ширококомовна синхронізація [20] не покладається на протоколи MAC, щоб уникнути щільної інтеграції додатка з рівнем MAC. Протоколи, які використовуються Mock et al., Ganeriwal et al., Sichitiu і Veerarittiphan покладаються на протокол CSMA / CA для рівня MAC.

Таблиця 3.2 Класифікація способів синхр. відповідно до особливостей мереж

Протокол	Однострибкова чи багатострибкова	MAC-рівень чи стандартний	Мобільність
RBS	Обидві	Стандартний	Ні
Romer	Обидві	Стандартний	Так
Mock et al.	Однострибкова	MAC-рівень	Ні
Ganeriwal et al.	Обидві	MAC-рівень	Так
Ping	Обидві	Стандартний	Ні
PalChaudhuri et al.	Обидві	Стандартний	Ні
Sichitiu and Veerarittiphan	Обидві	MAC-рівень	Ні
Time-diffusion protocol	Обидві	Стандартний	Так
Asynchronous diffusion	Обидві	Стандартний	Так

Висновки до розділу 3

В даному розділі було визначено поняття годинника в безпроводових сенсорних мережах, його функції та призначення, наведено математичне формулювання. Розглянуто можливі неточності в показах годинників, чим вони зумовлені та методи боротьби з ними. Увагу приділено фундаментальним підходам до синхронізації, на яких ґрунтуються багато протоколів синхронізації, детальніше котрі будуть розглянуті в 4-му розділі роботи. Наведено фактори, які виступають в якості переваг для кожного підходу. До таких підходів відносяться варіанти синхронізації передавач-приймач, приймач-приймач та лише приймач. Було проаналізовано можливу класифікацію протоколів синхронізації по таким критеріям, як: ведучий-ведений/рівноправна, мультистрибкова/однострибкова, зовнішня/внутрішня, за здатістю до мобільності та ін. За результатами класифікації побудовано дві таблиці протоколів із зазначенням підпадання під вищевказані категорії поділу.

4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРОТОКОЛІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ

4.1. Стислий огляд

У попередньому розділі було проаналізовано питання, що лежать в основі синхронізації часу в сенсорних мережах. Тепер коротко розглянемо існуючі протоколи синхронізації, їх переваги та недоліки. З огляду на те, що сенсорні мережі, як правило, тісно пов'язані з реальним середовищем, за котрим вони спостерігають, різні мережі матимуть різні характеристики, що впливають на їх вимоги до синхронізації. Універсального рішення, що дозволило б задовольнити всі вимоги різних мереж, не існує, і створити його неможливо. З огляду на це, кожен протокол має певну сферу застосування, що дозволяє якомога краще розкрити його сильні сторони і мінімізувати недоліки.

1. *Romer's protocol* успішно застосовується до мобільних ad-hoc-мереж, використовує інноваційний алгоритм перетворення часу для досягнення тактової синхронізації. Цей протокол є особливо ефективним в середовищах зі строгими обмеженнями ресурсів.

2. *Mock's protocol* розширює протокол ведучого-веденого IEEE 802.11, використовуючи властивість герметизації середовища зв'язку. Основними перевагами цього протоколу є мінімальна складність повідомлень і відмовостійкість.

3. *Network-wide Time Synchronization* орієнтований на мережу з великою щільністю вузлів.

4. *Delay Measurement Time Synchronization Protocol* для безпроводових сенсорних мереж є енергоефективним протоколом через його низьку складність повідомлень. Він також легший в обчислювальній вартості, хоча і менш точний, ніж протокол RBS.

5. *The Probabilistic Clock Synchronization Service* для БСМ розширює RBS, надаючи імовірнісні оцінки точності синхронізації годинників.

6. *Sichitiu and Veerarittiphan's protocol* забезпечує високу точність синхронізації в безпроводових сенсорних мережах при використанні детермінованого протоколу з мінімальними складностями обчислення і зберігання.

7. *The Time-Diffusion Protocol (TDP)* забезпечує загальний «рівноважний» час в мережі з використанням ітеративного зваженого методу усереднення, заснованого на поширенні повідомлень, що включають всі вузли в процесі синхронізації. Вузли в мережі динамічно структурують себе в деревоподібну конфігурацію, використовуючи два типи виборних ролей: головні вузли і дифузні вузли лідери. TDP розрізняє дві фази роботи: під час активної фази головні вузли обираються кожні τ секунд. Після кожної активної фази слідує неактивна фаза, в якій не відбувається синхронізація часу. Кожен інтервал τ секунд додатково ділиться на інтервали по δ секунд, кожен з яких починається з виборів дифузних вузлів лідерів. TDP виключає вузли, чиї годинники відхилені від годинників їх сусідів більш ніж на певне порогове значення.

Основними перевагами є терпимість до втрати повідомлень, орієнтованість на мобільність, можливість забезпечувати синхронізацію навіть без зовнішніх серверів часу.

Недоліки: висока складність; час конвергенції може бути високим, якщо не використовуються зовнішні точні сервери часу. Однак, якщо сервери використовуються, час конвергенції можна порівняти з технологією на базі сервера.

8. *The Asynchronous Diffusion protocol* використовує стратегію, подібну до TDP; однак мережеві вузли виконують протокол і асинхронно коректують свої годинники відносно один одного.

9. *Tiny-sync and Mini-sync Protocols* - два тісно пов'язаних протоколи, забезпечують попарну синхронізацію (яка може бути використана в якості основних будівельних блоків для синхронізації всієї сенсорної мережі) з низькою пропускнуою здатністю, пам'яттю і технологічними вимогами (Yoonet al.2007). Терпимі до втрат повідомлень.

Проте масштабованість і надійність протоколів не обговорювалася, час конвергенції, який є часом, необхідним для синхронізації всієї мережі, є високим.

Мережа датчиків логічно організована як ієрархія, що робить її непридатною до мереж мобільних датчиків.

4.2. Reference Broadcast Synchronization

Протокол базової широкомовної синхронізації (RBS) [9] заснований на підході синхронізації приймача-приймача (RRS) [20]. Відповідно до цієї властивості два приймача, розташовані на відстані прослуховування одного і того ж відправника, отримують одне й те саме повідомлення приблизно в один і той же час. Якщо кожен одержувач записує місцевий час, як тільки приходить повідомлення, всі приймачі можуть синхронізуватися з високим ступенем точності, порівнюючи їх локальні значення годинників, коли повідомлення було отримано. Цей протокол використовує послідовність повідомлень синхронізації від даного відправника, щоб оцінити зміщення і перекис локальних годинників відносно один одного.

Загалом, час, що витрачається на відправку повідомлення від відправника одержувачу, є результатом наступних чотирьох факторів, всі з яких можуть варіюватися недетермінованого: час відправки, час доступу, (час очікування доступу до каналу передачі), час поширення і час прийому. Протокол RBS використовує алгоритм, описаний нижче, для оцінки зсуву фази між годинниками двох приймачів:

1. Передавач передає контрольний пакет двом приймачам.
2. Кожен одержувач записує час, в яке був отриманий пакет, відповідно до його локального годинника.
3. Приймачі обмінюються спостереженим часом, коли вони отримали пакет.
4. Зсув годинників між двома приймачами обчислюється як різниця локального часу, коли приймачі отримували одне й те саме повідомлення.

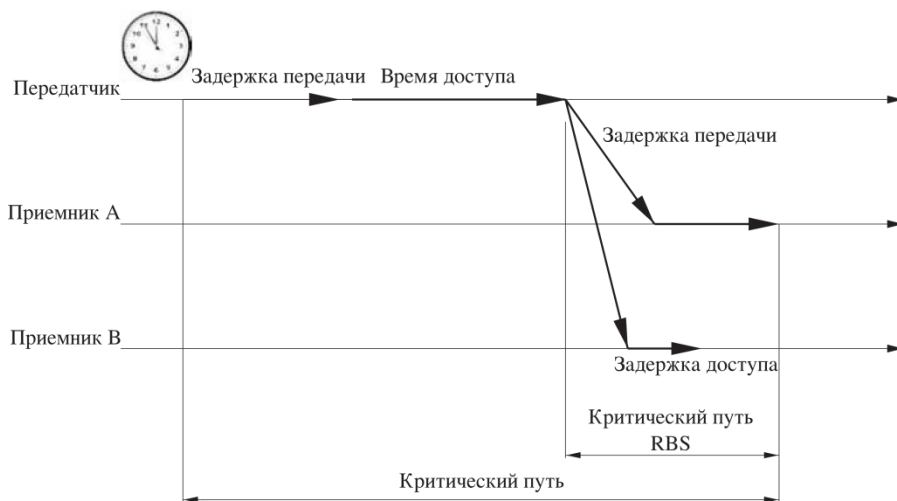


Рис 4.1 Аналіз критичного шляху при обміні повідомленнями синхронізації.

Коли оцінюються зміщення і перекіс годинників, локальні годинники вузлів не коригуються для синхронного запуску з глобальною шкалою часу. Замість цього кожен вузол зберігає таблицю параметрів, які пов'язують зміщення і перекіс вузла щодо всіх інших годинників у мережі. Кожен раз, коли зчитування годинників приймається від іншого вузла, вузол перевіряє свою таблицю, щоб перевести отримане значення годинника в локальний тимчасовий масштаб. Перевага цього методу полягає в тому, що значна енергія зберігається, уникаючи процесу виправлення або скидання локальних годин кожного вузла в глобальний час. Синхронізація виконується тільки тоді, коли це необхідно.

Загалом найбільш суттєвими перевагами є те, що найбільші джерела помилок (час відправлення і час доступу) видаляються з критичного шляху шляхом розв'язки передавача від приймачів, зміщення годинників і перекіс оцінюються незалежно один від одного та синхронізація по факту запобігає витратам енергії на дорозі оновлення годинників.

Недоліки: велика кількість обмінів повідомленнями в мережі, а також час конвергенції, тобто час, необхідний для синхронізації мережі, може бути високим внаслідок цього. Крім того, початковий відправник залишається несинхронізованим в цьому методі.

4.3. Lightweight time synchronization

Основною метою протоколу легкої деревовидної синхронізації (LTS) (VanGreunenandRabaey 2003) є забезпечення заданої точності (замість максимальної) з найменшійшими накладними витратами. LTS може використовуватися з різними алгоритмами, як з централізованою, так і з децентралізованою мультистрибковою синхронізацією. Для розуміння підходу пропонованого LTS, необхідно спочатку розглянути обмін повідомленнями для синхронізації парою вузлів. Рисунок 4.2 ілюструє графічний опис цієї схеми.

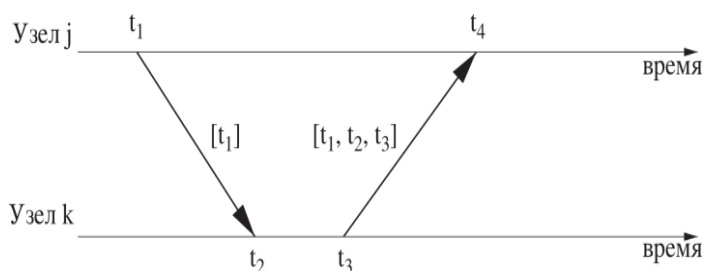


Рис. 4.2 Попарна синхронізація за допомогою LTS.

По-перше, вузол j передає синхронізаційне повідомлення з тимчасовим ярликом вузлу k за час передачі t_1 . Після доставки цього повідомлення на вузол k в момент часу t_2 , вузол k відповідає повідомленням, що несе тимчасової ярлик t_3 і попередньо записаний час t_1 і t_2 . Це повідомлення отримано вузлом j в момент часу t_4 . Зверніть увагу, що час t_1 і t_4 заснований на годиннику вузла j , в той час як час t_2 і t_3 записано з використанням годинника вузла k .

Централізована мультистрибкова версія LTS заснована на одному опорному вузлі, який є коренем сполучного дерева і включає в себе всі вузли в мережі. Для того, щоб максимально збільшити точність синхронізації, глибина дерева повинна бути зведена до мінімуму. Це пов'язано з тим, що помилки, що виникають в результаті попарної синхронізації, є додатковими і, отже, їх кількість збільшується уздовж гілок дерева в залежності від кількості стрибків. Після того, як дерево було встановлено, опорний вузол ініціює синхронізацію, за допомогою виконання попарної синхронізації з кожним зі своїх потомків. Після синхронізації кожен

потомок повторює цей крок зі своїми власними до тих пір, поки всі вузли синхронізуються.

4.4. Timing-sync Protocol

Timing-sync Protocol for SensorNetworks (TPSN) (Ganeriwaletal.2003) є ще одним традиційним підходом синхронізації відправник-приймач, який використовує дерево для організації мережі. TPSN використовує дві фази для синхронізації: фазу відкриття рівня (виконується під час розгортання мережі) і фазу синхронізації. Метою фази відкриття рівня є створення ієрархічної топології мережі, де кожному вузлу присвоєно рівень з кореневим вузлом, котрий знаходиться на рівні 0. Кореневий вузол ініціює цю фазу шляхом трансляції повідомлення (`level_discovery`). Кожен найближчий сусід кореневого вузла використовує це повідомлення для визначення свого рівня (тобто, рівень 1) і ретранслює це повідомлення зі своїм власним ідентифікатором і рівнем. Цей процес повторюється до тих пір, поки кожен вузол в мережі визначить свій рівень.

Під час фази синхронізації TPSN використовує попарну синхронізацію уздовж країв ієрархічної структури, встановленої в попередній фазі, тобто кожен вузол рівня i синхронізує свій годинник з вузлами на рівні $i-1$. Вузол j видає імпульс синхронізації в момент часу t_1 , що містить рівень цього вузла та тимчасовий ярлик. Це повідомлення отримано вузлом k в момент часу t_2 і вузол k відповідає підтвердженням в момент часу t_3 (що містить тимчасові ярлики t_1 , t_2 , t_3 і рівень вузла k). І нарешті, цей пакет, отриманий вузлом j в момент часу t_4 .

Фаза синхронізації ініціюється кореневим вузлом, який видає `time_sync` пакет. Після очікування протягом деякого випадкового часу, вузли в рівні 1 ініціюють двосторонній обмін повідомленнями з кореневим вузлом. Після того, як вузол в рівні 1 отримує підтвердження від кореня, він обчислює своє зміщення і налаштовує свій годинник. Вузли на рівні 2 підслуховують синхронізаційні імпульси, що видаються їх сусідами на рівні 1 і через певний час затримки, вони ініціюють свою попарну синхронізацію з вузлами в рівні 1. Час затримки потрібен,

щоб надати вузлам рівня 1 час для отримання і обробки підтвердження своїх синхронізаційних імпульсів. Цей процес триває в усій ієрархічній структурі до тих пір, поки всі вузли не синхронізуються з кореневим вузлом.

4.5. Flooding Time Synchronization Protocol

Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) (Mar' otiet al.2004) [5] об'єднує переваги RBS і TPSN. Його цілями є досягнення загальномережевої синхронізації з помилками в діапазоні мікросекунд, масштабованість до сотень вузлів і стійкість до змін в топології мережі, включаючи відмови лінків і вузлів. FTSP використовує пакет для створення декількох тимчасових міток і використовує лінійний регресійний аналіз для оцінки перекосу годинників і зміщення. Це не тільки виключає вплив затримки відправника, але також ефективно оцінює невизначеність затримки одержувача пакета. Основним недоліком FTSP є те, що він вимагає калібрування на апаратному забезпеченні, (отже, це не чисто програмне рішення, яке не залежить від апаратного забезпечення). У FTSP кожен вузол повинен транслювати точку даних і оцінювати перекіс і зміщення з використанням лінійної регресії. Але в багатьох додатках БСМ функціонал кінцевого вузла дуже простий для економії витрат. Трансляція і математичне обчислення лінійної регресії надають кінцевому вузлу велике навантаження. Таким чином, FTSP дуже залежить від апаратного забезпечення вузла і дуже підходить для випадку високої точності.

FTSP відрізняється від інших рішень тим, що він використовує одиночне широкомовлення для встановлення точок синхронізації між відправником і приймачами, усуваючи більшість джерел помилок синхронізації. FTSP синхронізує час відправника з можливими кількома приймачами, використовуючи одне радіоповідомлення з міткою часу як на стороні відправника, так і на стороні одержувача.

4.6. Pairwise Broadcast Synchronization

Протокол PBS використовує як синхронні підходи приймача-приймача, так і приймача для досягнення широкомасштабної синхронізації мережі з високою енергоефективністю, [12]. У PBS кілька вузлів датчиків можуть бути синхронізовані тільки за допомогою обміну сигналами синхронізації, які обмінюються між парами вузлів. PBS вимагає набагато меншої кількості повідомлень синхронізації, ніж інші протоколи, такі як RBS, TPSN і FTSP, і його переваги значно зростають у міру того, як датчики більш щільно розгорнуті, завдяки цьому значно знижується загальне споживання енергії [27].

Насправді, аналогічна концепція, що поєднує переваги як RRS, так і SRS-підходів, застосовується в протоколі дифузії часу (TDP). TDP обирає лідерів поширення на всіх рівнях мережі, а обрані лідери послідовно транслюють повідомлення синхронізації. Однак, на відміну від TDP, протокол PBS вибирає найкращий набір пар синхронізації, щоб мінімізувати загальну кількість повідомлень синхронізації і споживання енергії, тоді як TDP ґрунтується на дуже різних умовах вибору: балансі робочих навантажень і стабільності годинників.

4.7 Метод синхронізації часу, заснований на поведінці мурашиної колонії

Протягом багатьох років ботаніки та натуралісти аналізували поведінку і характеристики соціальних комах через дивну ефективність цих природних екологічних процесів. На основі такого нагляду було введено багато нових винаходів та зроблено відкриттів.

Як вже було згадано вище, ємність батарей сенсорних вузлів є одним з головних обмежень в БСМ, тому кращий вибір пар датчиків для синхронізації мережі та зведення до мінімуму кількості обміну повідомленнями істотно збільшують час життя джерела живлення. Таким чином, нижчеописана концепція є презентацією протоколу енергозберігаючої синхронізації часу, заснованого на оптимізації руху мурашиної колонії.

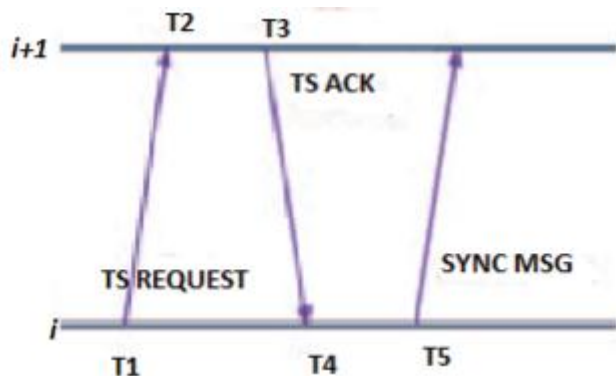
Найперший приклад розглядається як найбільш важливий і був розроблений раніше, відомий як Ant Colony Optimization (ACO) [41], введений М. Dorigo і був спочатку використаний для задач оптимізації в кінці 80-х років. АСО заснований на поведінці колоній мурашок з точки зору пошуку їжі і секреції речовин. Сама природа мурах, їх здатність до самоорганізації, а також здатність знаходити кращий



маршрут або шлях до їжі з використанням хімічної речовин, званих феромонами, які залишають мурахи при ходьбі, щоб відзначити свій слід [42] була покладена в основу проповнованого підходу до синхронізації. Феромон привертає інших мурах для слідування по маршруту. На малюнку 4.3 представлена ця концепція.

Рис 4.3. Поведінка мурах, якщо на їх шляху є яка-небудь перешкода.

Основний процес синхронізації включає двонаправлене повідомлення для отримання часу синхронізації вузлів в системі. Це буде початковий етап процесу синхронізації часу. Тепер $T1$ - це мітка часу, коли вузол 1 відправляє повідомлення (TS REQUEST), а $T2$ - це мітка часу, коли вузол 2 отримує повідомлення TS REQUEST. $T3$ буде відміткою часу, коли вузол 2 відправить повідомлення підтвердження (TS ACK) в вузол 1, який покаже, що вузол 2 прийняв повідомлення $T1$, а $T4$ - мітка часу, в якій вузол 1 приймає $T3$. SYNC MSG включає в себе $T1$ і $T4$, які використовуються для завершення механізму синхронізації.



Знаючи значення цих тимчасових міток, синхронізує зміщення Δ між сусідніми вузлами і тимчасова затримка d через тактового дрейфу обчислюється для процесу синхронізації.

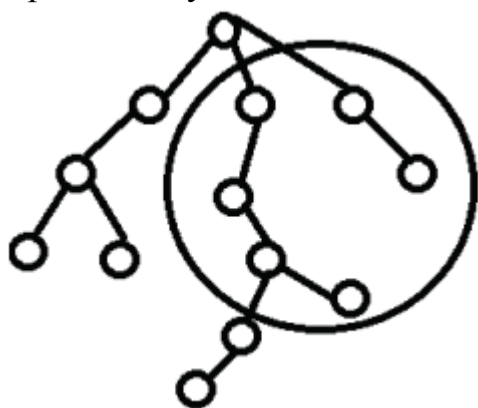
Рис 4.4. Обмін повідомленнями між вузлами в мережевий системі.

Припустимо, що поточна мережа містить $(N-1)$ число вузлів, які не синхронізовані, і один вузол, який можна розглядати як опорний вузол P .

Початковий процес синхронізації може бути описаний в два етапи:

Вибір діапазону алгоритмів: перше, що потрібно зробити, - встановити діапазон, в якому буде працювати алгоритм. Діапазон повинен складатися з максимуму вузлів і повинен містити також шари ієрархії.

Обмін вихідними повідомленнями: другий етап включає обмін початковим повідомленням кожним вузлом з усіма сусідніми вузлами. Знаходиться центральний вузол. Він відповідає за зв'язок з кожним іншим вузлом в описаному



радіусі. Енергія всіх вузлів приймається так, щоб дізнатися вузол, який випромінював найбільшу енергію, а також в кожен вузол поміщається лічильник, щоб підраховувати повідомлення, якими обмінюється кожна сторона.

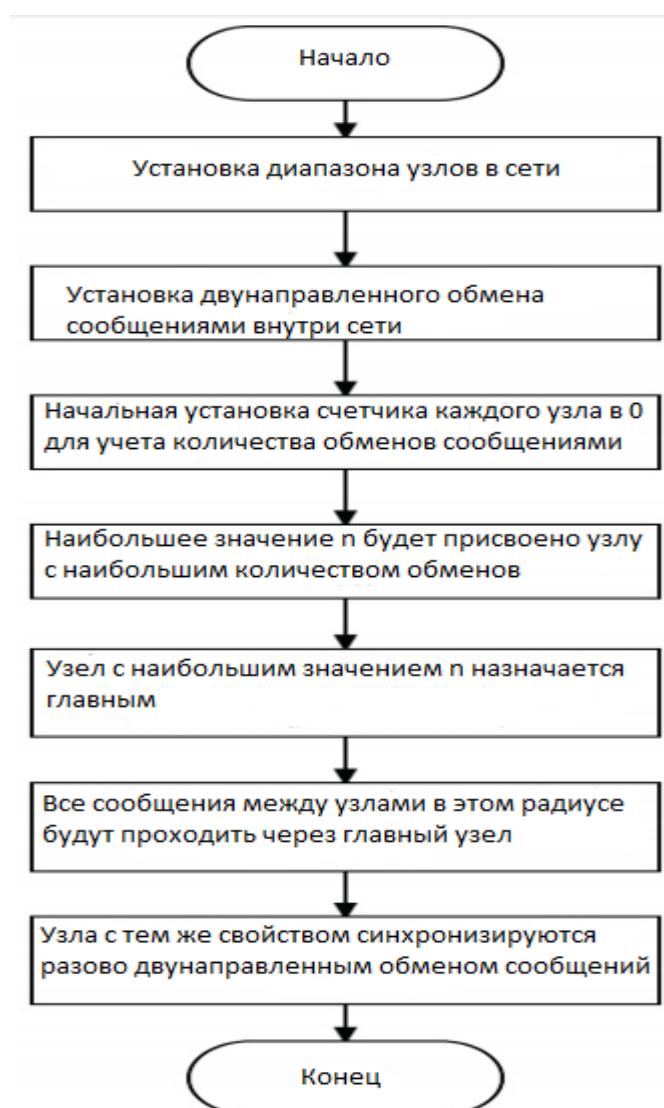
Рис 4.5. Встановлення радіусу області, яка буде синхронізована.

Основна ідея оптимізації для тимчасової синхронізації- це створення синхронізованого, точного і безпомилкового середовища обміну повідомленнями та даними між мережами бездротових датчиків. Після повідомлення ініціалізації вибираються кращі пари вузлів. Це робиться шляхом прийняття одного вузла в якості центрального вузла, а інші вузли зв'яжуться з ним. Ключовим завданням цього методу є вибір правильного центрального вузла. Мережа розглядається як колонія мурашок, і їх атрибути грають важливу роль в цьому алгоритмі.

Феромони, які мурахи залишають на своєму шляху, вважаються енергією, яку кожен вузол буде випромінювати при відправці повідомлення по шляху до іншого вузла. Рівень енергії центрального вузла буде найвищим, оскільки кожен вузол зв'язується з ним. Цей тип поведінки спостерігається у мурах, коли вони досягають їжі. Найбільша кількість феромоновими осаду знаходиться на найкоротшому шляху до їжі. Цей шлях використовується іншими мураками для

комутації між колонією мурах і їжею [43]. Щоб переконатися, що пропонувана ідея дає точний результат, лічильник також міститься на кожному вузлі для перевірки кількості обмінів повідомленнями. Найбільшу кількість повідомлень, обмінюваних в процесі ініціалізації, матиме центральний вузол. Лише два вузла будуть зв'язуватися одночасно - центральний і будь-який інший.

Центральний вузол відповідає за обмін повідомленнями між усіма іншими вузлами. Таким чином, тільки найбільш відповідні пари будуть повідомлятися в якийсь момент. Якщо традиційний процес дотриманий, зв'язок між віддаленими вузлами займе багато кроків і безліч проміжних вузлів, що може викликати проблеми в процесі синхронізації через збільшення помилки або її ймовірності. Таким чином, АСО робить процес синхронізації більш точним і тим самим зменшує обмін повідомленнями. Процес оптимізації представлений на блок-схемі нижче:



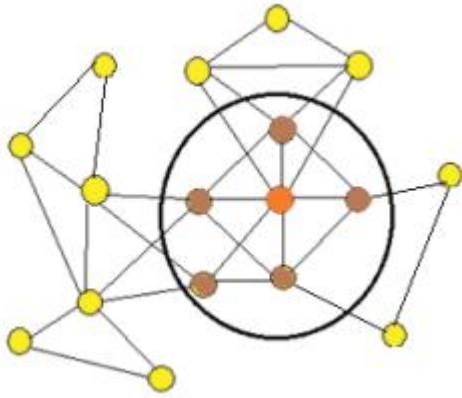


Рис. 4.6. Це приклад мережі з радіусом r . Помаранчевий вузол є центральним вузлом.

Пошук зміщення годин ТД і тимчасової затримки d через тактового дрейфу. Останній крок - розрахувати зміщення годинників і тимчасову затримку вузла для їх синхронізації. Це може бути зроблено шляхом

обміну повідомленнями з двох сторін і прийняття їх значень для обчислення ТД і d :

$$T\Delta = [(T2 - T1) - (T4 - T3)] / 2$$

$$d = [(T2 - T1) + (T4 - T3)] / 2$$

У цьому розділі обговорюється метод синхронізації, що базується на оптимізації колонії мурах, щоб визначити центральний вузол. Він порівнюється з RBS, щоб показати ефективність запропонованої методики. RBS є найбільш базовим протоколом - це двосторонній зв'язок, в якому всі вузли обмінюються повідомленнями у визначеній області. Мета полягає в тому, щоб досягти відмінності часу між тимчасовою відміткою відправника, коли він надсилає повідомлення та часовим показником одержувача, коли він отримує те саме. Коли кількість вузлів збільшується, то кількість повідомлень, котрими вони обмінюються, також збільшиться. Але пропонується метод спрямований на мінімальне збільшення кількості повідомлень для досягнення точності та меншої вірогідності помилок. Необхідно вибрати набір даних, що містять різні вузли, в яких одне і те ж повідомлення надсилається кілька разів, щоб записати результат у кожній можливій точці. У таблиці 4.1. наведено порівняння повідомлень, обмінюваних алгоритмом RBS, TPSN та ACOTSP. На рисунку 5 та рис.6 представлені графіки для найкращого випадку та середній випадок алгоритму ACOTS відповідно. Щоб спростити обчислення та обчислити споживання енергії цих трьох систем, припускається, що при посилянні або одержанні одного повідомлення виробляється постійна енергія. Для графа порівняння беремо повну

потужність 0,660 Вт для кожного повідомлення, відправленого або отриманого вузлом. Це показано на рисунку 4.7.

Таблиця 4.1.

К-ть вузлів	RBS	TPSN	ACOTSP кращий випадок	ACOTSP середнє значення
20	380	48	24	39
40	1560	98	44	79
60	3540	148	64	119
80	6320	198	84	159
100	9900	248	104	199

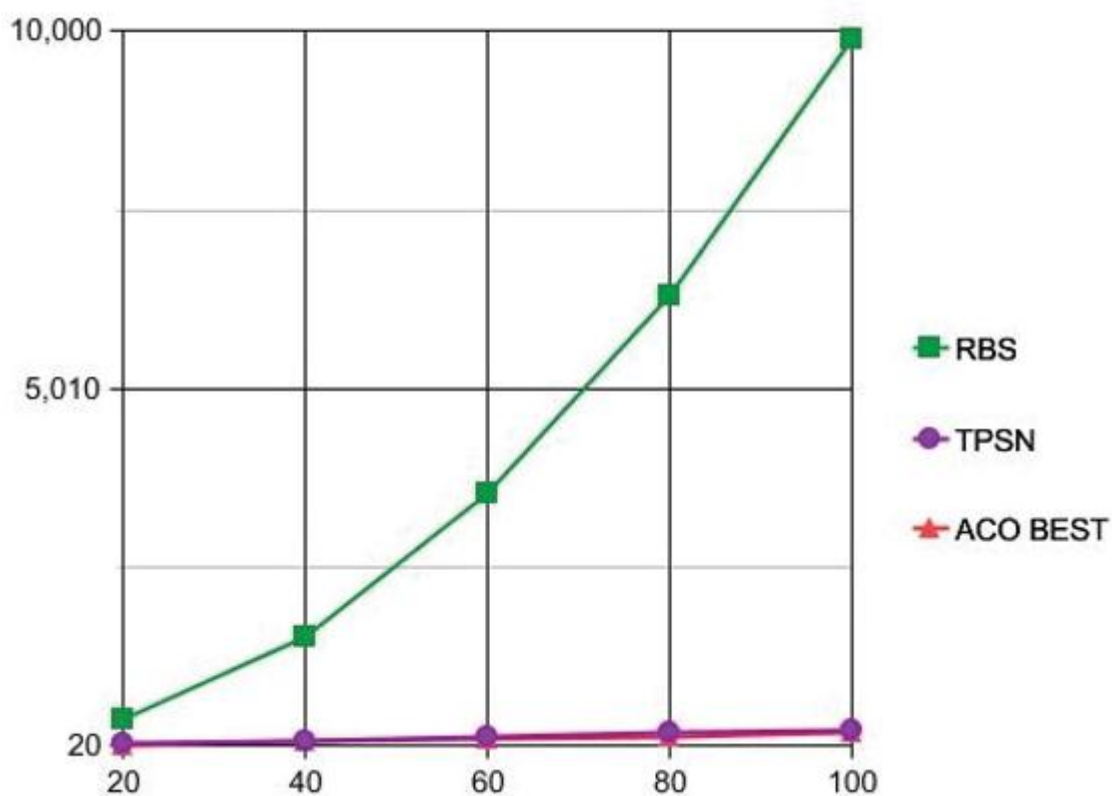


Рис. 4.7 Залежність кількості повідомлень від кількості вузлів

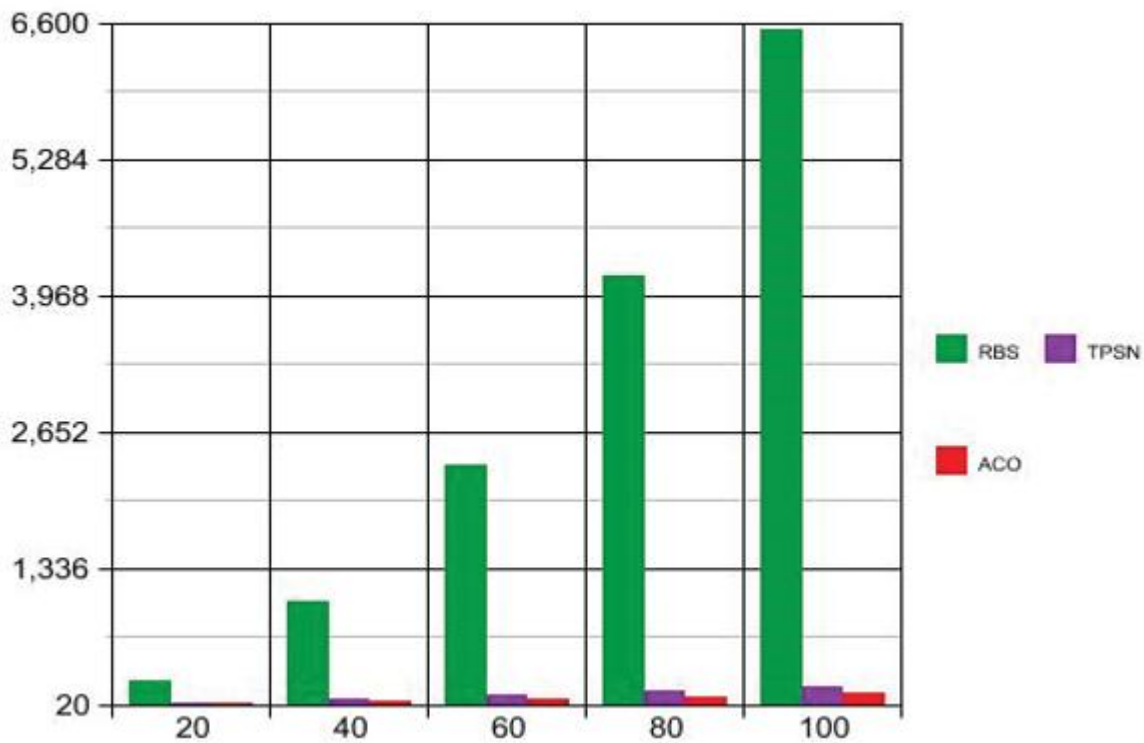


Рис. 4.8 Залежність енергоспоживання від кількості вузлів.

Як бачимо, запропонований метод використовує меншу кількість обмінів повідомленнями між вузлами, а також суттєво випереджає за показником енергоефективності RBS та є кращим за TPSN.

Висновки до розділу 4

В даному розділі були розглянуті протоколи синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах, які були спеціально розроблені з урахуванням всіх обмежень та особливостей, характерним BCM: Reference Broadcast Synchronization, Lightweight time synchronization, Timing-sync Protocol, Flooding Time Synchronization Protocol, Time-Diffusion Synchronization Protocol, Pairwise Broadcast Synchronization, Tiny-sync and Miny-sync protocol та інші. Кожен з вищезазначених протоколів має свою сферу застосування та відповідні їй свої сильні сторони і переваги. Проте у кожного з них є свої недоліки, адже зовсім нівелювати їх або уникнути неможливо.

Також було запропоновано метод синхронізації часу на основі оптимізації колонії мурах та проведено його імітаційне моделювання в середовищі Matlab в порівнянні з іншими існуючими протоколами.

5. МЕТОД ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКИХ ТА ПОВІЛЬНИХ ЛОКАЛЬНИХ ГОДИННИКІВ

5.1 Постановка задачі

Найпоширенішими є безпроводові сенсорні мережі з автономним електроживленням сенсорних вузлів. Очікуваний час роботи такого сенсорного вузла становить кілька років. Настільки великий термін роботи можливий за рахунок імпульсного характеру роботи мережі: більшу частину часу вузли знаходяться в режимі мінімального енергоспоживання (сну), не виконуючи жодних операцій. Періодично вузли переходять в активний режим, зчитуючи інформацію про навколишнє середовища (наприклад, знімають показники вологості або температури) та обмінюються даними з сусідніми вузлами. Для організації сеансу зв'язку необхідно, щоб всі сенсори, які приймають участь в цьому сеансі, одночасно включили свої прийомопередавачі. Це вимагає синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів. Крім того, точний час на сенсорному вузлі необхідний для формування часових міток даних, зчитаних з сенсорів. Розглянемо можливі варіанти сеансу зв'язку.

1) Приймач сенсорного вузла починає прослуховувати ефір трішки раніше, ніж передаючий вузол вмикає передавач і починає відправку пакету. Такий сеанс зв'язку буде успішним і він представлений на рис.4.1.

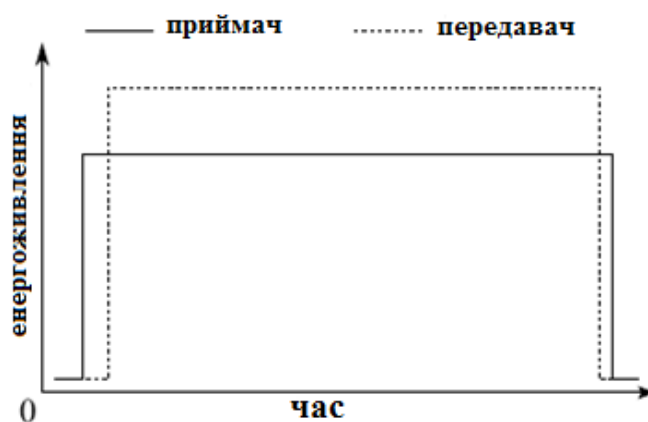


Рис 5.1. Успішний сеанс зв'язку: приймаючий вузол починає прослуховувати ефір лише трішки раніше, ніж передаючий вузол починає відправку пакету

2) Розглянемо сеанс зв'язку, коли поступова розсинхронізація локальних годинників сенсорів приводить до того, що приймач сенсорного вузла починає прослуховувати ефір набагато раніше, ніж передаючий вузол вмикає передавач і починає відправку пакету. Такий сеанс зв'язку представлений на рис.4.2. Цей сеанс буде неефективним оскільки сенсорний вузол витрачає набагато більше часу на прослуховування, ніж на отримання переданого пакету.

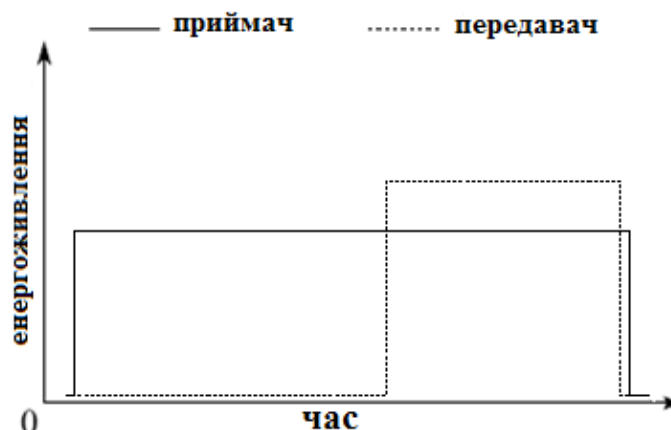


Рисунок 5.2. Неефективний сеанс зв'язку: приймаючий вузол витрачає забагато часу на очікування пакету (прослуховування ефіру)

3) На рис.4.3 представлений неуспішний сеанс зв'язку: приймаючий сенсор закінчив сеанс прослуховування ефіру раніше, ніж передаючий вузол почав відправляти пакет. В цьому випадку синхронізація вузлів порушена, тому передача пакетів не відбулася.

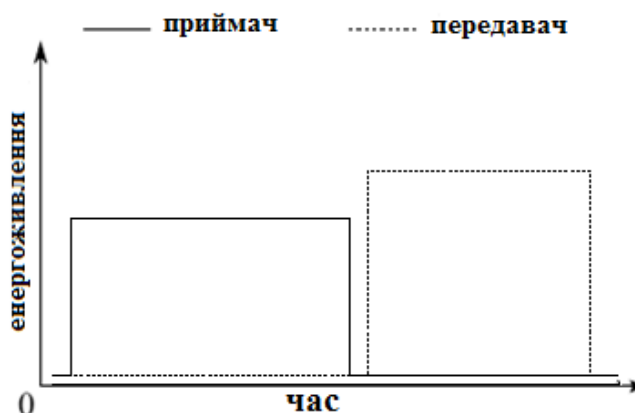


Рисунок 5.3. Невдалий сеанс зв'язку: приймаючий вузол закінчив сеанс прослуховування ефіру раніше, ніж передаючий вузол почав відправку пакетів

Приймач - основне джерело витрат енергії в сенсорному вузлі. Мінімізуючи час його роботи, можна отримати суттєвий вииграш щодо економії енергії. Чим краще синхронізовані між собою годинник передавального і приймаючого вузлів, тим менший запас в інтервалі прослуховування може допускати приймаючий вузол, і тим менше енергії він витратить на порожнє прослуховування ефіру. Погана синхронізація сприяє неефективній витраті енергії на приймаючому вузлі.

З вище наведеного аналізу випливає, що необхідно використовувати як можна точніший метод синхронізації для забезпечення мінімального енергоспоживання сенсорними вузлами, а отже і максимального терміну їх роботи.

У багатьох описаних вище дослідженнях (зокрема, LTS, TPSN, FTSP) є один спільний недолік - у них використовуються швидкі годинники, що працюють постійно. Хоч при цьому і з'являється можливість досягти високої точності синхронізації часу, але одночасно серйозно страждає енергетична ефективність, оскільки постійно працюючий швидкий генератор споживає порівняно багато енергії. У деяких розподілених системах, наприклад, в SDN в якості засобу синхронізації часу використовуються системи глобального позиціонування GPS або Глонасс. Система GPS забезпечує точність визначення часу порядку 240 нс [40]. Однак установка GPS -модуля призведе до значного збільшення вартості вузла сенсорної мережі, а також до зростання енергоспоживання вузла, зводячи, таким чином, нанівець вииграш від високоточної синхронізації годинників. Крім того, стійка робота GPS неможлива всередині будівель. Таким чином, у вищезазначених підходах досягається або низьке енергоспоживання, або висока точність. Однак необхідно домогтися досить високої точності, не жертвуючи при цьому енергоспоживанням.

5.2 Основна ідея методу

Пропонований підхід ґрунтується на використанні специфічної апаратної платформи для створення сенсорного вузла. Вузол матиме два локальні годинники, а саме:

- швидкий (1 МГц), що має високу стабільність (3,3 ppm), але й порівняно високе енергоспоживання (близько 1 мА);
- повільний (32768 Гц), що має низьку стабільність (36 ppm) але і низьке енергоспоживання (0,01 мА).

Передбачається, що повільний годинник працює постійно і забезпечує вихід сенсорного вузла з режиму сну. Повільні локальні годинники сенсорних вузлів тактуються від кварцового резонатора камертонного типу. Для цих резонаторів характерна значна зміна частоти в залежності від температури (рис. 4.5). Швидкий годинник в режимі сну не працює, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання. У періоди сеансів зв'язку швидкий годинник використовуються для визначення точного часу включення прийомопередавача.

Для зменшення швидкості розходження локальних годинників сенсорних вузлів, кожен з вузлів автономно виконує калібрування повільних годинників по швидким, також слід враховувати температурну поправку при розрахунку часових інтервалів, про котру йтиметься далі. Для усунення розбіжності, що залишається, при кожному сеансі зв'язку проводиться синхронізація. Слід зазначити, що в результаті роботи описаних алгоритмів насправді не відбувається наведення локальних годинників сенсорних вузлів, а знаходяться лише коефіцієнти, що впливають на обчислення часових інтервалів, і розрахунок часу наступного сеансу зв'язку.

Запропонований метод дозволяє досягти попарної синхронізації вузлів БСМ. Це означає, що кожен з вузлів сенсорної мережі підтримує актуальну інформацію про розходження його власного годинника з годинником тільки тих вузлів, з якими даний вузол зв'язується або знаходиться по-сусідству. Існують моделі синхронізації часу, в яких час підтримується синхронізованим по всій мережі, але це ускладнює алгоритми і призводить до більшої витрати енергії, в більшості випадків, не даючи значних переваг.

5.3 Врахування температурних поправок

Частота роботи кварцових резонаторів змінюється залежно від температури, причому до її впливу чутливий як швидкий, так і повільний кварцові резонатори. На рис. 4.5 [37] і рис. 4.6 показані залежності величини зміни частот повільного і швидкого кварцових резонаторів щодо температури. Для повільного резонатора графік побудований на основі даних виробника, для швидкого резонатора дані взяті зі статті [38], так як виробники, як правило, не вказують цих даних.

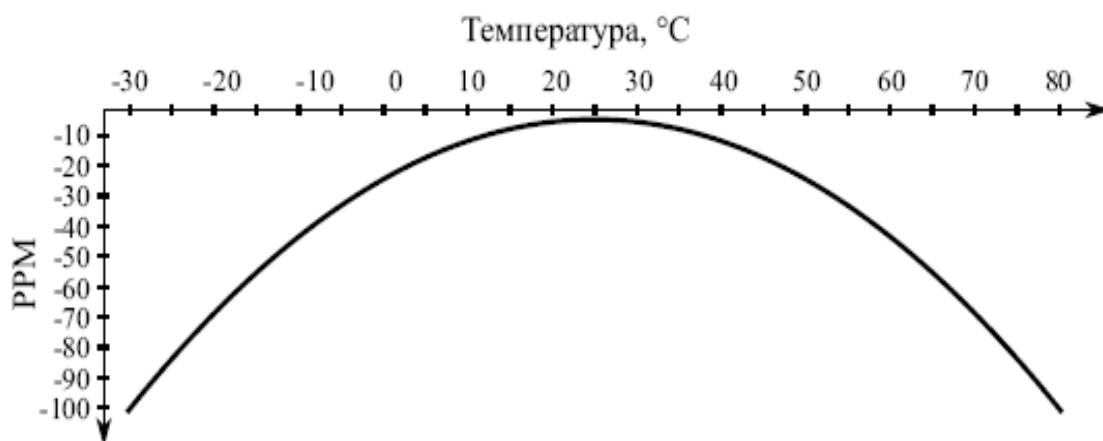


Рис. 5.4. Залежність частоти повільного кварцового резонатора від температури. При відхиленні температури від номінальної (25°C) частота зменшується

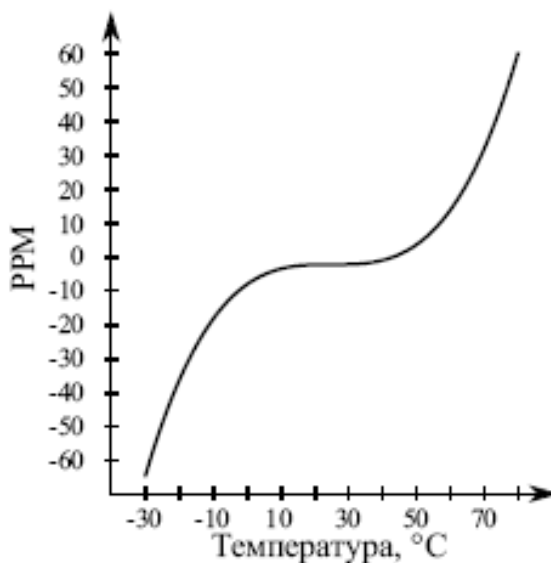


Рис. 5.5. Залежність частоти швидкого кварцового резонатора від температури

З огляду на те, що швидкий годинник використовуються тільки для вимірювання тільки відносно коротких часових інтервалів, то впливом температури на них можна знехтувати. Основну ж частину часу вузли БСМ використовують повільні годинники. Пропонується наступна процедура врахування температурних поправок, що виконується регулярно (наприклад, 1 раз на декілька секунд) і включає в себе наступні дії:

- опитуються датчики температури;
- на основі показань датчика температури для кожного сенсора і даних

на рис. 4.5 обчислюється відхилення поточної частоти кварцового резонатора від номінальної:

$$d = \frac{32768}{1000000} \times p \quad (5.1),$$

де d - шукане відхилення (в Гц),

p - зміна частоти при поточній температурі (в ppm);

- обчислення часу t_1 , що пройшов з попереднього запуску процедури (він рівний тривалості інтервалу корекції);
- обчислення часу t_2 , що пройшов з попереднього запуску процедури з урахуванням відхилення частоти за формулою (5.2):

$$t_2 = \frac{t_1 \times 32768}{32768 - d} \times p \quad (5.2)$$

- обчислення різниці між t_1 і t_2 і збереження отриманої величини в змінну, що накопичує значення поправки:

$$t_d = t_1 - t_2 \quad (5.3)$$

Перед використанням показників повільних годинників необхідно додати до них накопичену величину поправки. Зміна температури - поступовий процес, але в пропонованій процедурі це не враховується і температура протягом інтервалу корекції приймається рівною температурі в кінці інтервалу корекції. При достатній частоті виклику процедури цей факт не вплине на одержуваний результат. Як альтернативу можна використовувати температурно-компенсовані генератори [39],

але вони споживають більшу кількість енергії і мають високу вартість. Ще один спосіб полягає в побудові корекційних таблиць за результатами калібрування кожного конкретного екземпляра кварцового резонатора в термокамері.

5.4 Процедура калібрування повільних годинників по швидких

Ідея калібрування полягає в тому, щоб виміряти один і той же досить тривалий часовий проміжок і повільним, і швидким локальними годинниками, а потім обчислити коефіцієнт, який дозволить компенсувати розбіжність повільних годинників. Цей випадок - єдиний в робочому циклі пристроїв БСМ, коли швидкий годинник використовуються для вимірювання настільки тривалого часового проміжку, тому також має сенс застосовувати до них процедуру врахування температурних поправок, описано в пункті 5.3. Процедура передбачає наступні дії:

(1) Відключається звичайний перехід пристрою в режим сну. Це необхідно для того, щоб швидкий годинник під час калібрування не зупинявся.

(2) Відбувається зчитування показників повільного годинника, в цей же момент знімаються показники швидкого годинника.

(3) Відбувається очікування протягом відносного великого часового інтервалу (>900 мс).

(4) Відбувається зчитування показників повільного годинника, в цей же момент також знімаються показники швидкого годинника.

(5) На основі отриманих значень часу для обох годинників, обчислюється калібрувальний коефіцієнт за формулою (4.4):

$$C_c = 1 + \frac{\Delta_f - \Delta_s}{\Delta_s} \quad (5.4)$$

де C_c - шуканий калібрувальний коефіцієнт;

Δ_f - час, що минув між пунктами 2 і 4 згідно швидкому годиннику;

Δ_s - час, що минув між пунктами 2 і 4 згідно повільному годиннику.

Процедура проводиться замість одного з довгих (> 900 мс) періодів сну вузла БСМ. Таким чином тривала монополізація процесора залишається непоміченою і не заважає роботі інших процесів, що відбуваються для сенсора. Отриманий калібрувальний коефіцієнт щоразу застосовується при зверненні до показань повільних годинників. Процедура калібрування дозволяє мінімізувати вплив відхилення робочої частоти конкретного екземпляра кварцового резонатора від номінальної. Калібрування проводиться один раз при старті вузла БСМ, але періодично може повторюватися для компенсації можливого накопичення помилки.

За даними, отриманими експериментальним шляхом, відомо, що відкалібровані повільні локальні годинники двох вузлів розходяться зі швидкістю ~ 4 ppm. Таким чином, швидкість розбіжності практично доведена до мінімально можливої (3,3 ppm) для конкретної апаратної платформи.

5.5 Алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ

Вищеописані механізми дозволяють добитися мінімальної розбіжності локальних годинників на одному сенсорі, але з часом годинники різних пристроїв будуть розходитися один щодо іншого. Основною причиною цього є зміна температури пристроїв. Іншою причиною є тимчасова нестабільність кварцових резонаторів (зміна робочої частоти з часом), з якою не вдається боротися методом калібрування, так як і швидкий, і повільний кварцові резонатори, згідно з паспортними даними, мають однакову часову нестабільність, рівну ± 3 ppm / рік. Це говорить про необхідність введення методу корекції розбіжностей годинників під час роботи сенсорів в реальних умовах.

Початкова синхронізація локальних годинників сенсорів досягається під час процедури конфігурації - при підключенні нового сенсорного вузла до існуючої

мережі. Після цього є актуальним питання підтримки синхронізації. Для цього було розроблено і запропоновано алгоритм, що описаний нижче:

(1) Приймаючий вузол під час планування чергового сеансу зв'язку оцінює час, через який має відбутися сеанс. Тривалість інтервалу прослуховування тим більше, чим більше час до наступного сеансу. Сеанс планується таким чином, щоб момент прийому пакета від передавального вузла припадав точно на середину інтервалу .

(2) Настає час сеансу, передаючий вузол виконує одну з дій:

(а) якщо є дані для відправки, то вузол передає звичайний пакет з даними;

(б) якщо даних немає, то для підтримки синхронізації передається пакет мінімальної довжини (15 байт для мереж 802.15.4).

(3) Приймаючий вузол, використовуючи переривання RX_START, зберігає тимчасову мітку початку отримання пакета (рис.4.7). Пакет обробляється пристроєм як звичайно. Після цього обчислюється різниця D між фактичним і очікуваним часом початку отримання пакету і проводиться зсув часу наступного сеансу за формулою (4.5):

$$C'_s = C_s + D \quad (5.5)$$



Рис. 5.6. Час початку отримання пакета зберігається обробником переривання
RX_START

Крім того, якщо отримуємо $D \neq 0$, то це означає, що годинники сенсорів йдуть з різною швидкістю. Можна оцінити швидкість розходження годинників і використовувати її при плануванні часу наступного сеансу. Шукана швидкість розбіжності визначається формулою (5.6):

$$S = \frac{D}{T_{sync}} \quad (5.6)$$

де T_{sync} - час, що минув з моменту попередньої синхронізації. Знак S показує напрямок розходження. Величина компенсації буде обчислюватися наступним чином:

$$C_d = T_{next} \times S \quad (5.7)$$

де T_{next} - час до наступного сеансу зв'язку.

Варто також відзначити, що запропонований спосіб синхронізації - пасивний, що означає відсутність спеціально переданих в цілях синхронізації даних. Таким чином, необхідно, щоб при плануванні сеансу зв'язку, спираючись на показники локального годинника, сенсор БСМ враховував:

C_c - калібровочну поправку;

C_t - температурну поправку;

C_s - поправку на відому розбіжність;

C_d - компенсацію різниці швидкостей годинників;

C_u - запас на максимальне розходження годинників за час, що минув з моменту останньої синхронізації.

При отриманні показань повільних годинників враховуються калібрувальна і температурна поправки:

$$t = t' \times C_c + C_t \quad (5.8)$$

де t' - початкові показання повільного годинника;

t – показники повільного годинника з урахуванням поправок.

Нехай наступний сеанс зв'язку по протоколу повинен відбутися через час T . Тоді по локальному годиннику сенсора сеанс слід провести через час:

$$T' = T + C_s + C_d - \frac{C_u}{2} \quad (5.9)$$

Необхідно врахувати, що тривалість інтервалу прослуховування для одного сеансу зв'язку повинна бути також збільшена на $\frac{C_u}{2}$. Базова тривалість інтервалу прослуховування T_w приймається рівною подвоєнній точності синхронізації. Швидкість розходження, що визначає поправку C_d , може відносно швидко змінюватися під час роботи пристроїв (наприклад, в результаті зміни температури одного з пристроїв). Тому поправка C_d не застосовується, якщо швидкість розбіжності була обчислена на основі даних, отриманих більше, ніж за N секунд назад, де N - параметр, який задається адміністратором мережі.

Час від часу запланований сеанс зв'язку може не відбутися, наприклад, через дії потужної перешкоди в момент часу, що вибраний для сеансу зв'язку. У такому випадку чергова синхронізація годинників не відбудеться, і при плануванні наступного сеансу зв'язку приймаючий вузол повинен попередньо збільшити запас T_w . Збільшення T_w також відбувається, якщо не застосовувалася поправка C_d .

Висновки до розділу 5

В магістерській дисертації було допрацьовано метод прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників. Даний метод передбачає значне підвищення енергоефективності безпроводових сенсорних мереж за рахунок високоточної синхронізації часу вузлів БСМ.

Доцільним є провести імітаційне моделювання в підтвердження отриманих теоретичних результатів. Змоделюємо за допомогою програмного пакету Matlab + Simulink сенсорну мережу і проведемо дослідження середньоквадратичного значення кількості помилок від кількості повідомлень в мережі для трьох методів RBS, TPSN та високоточної. На рис. 4.8 представлені результати моделювання безпроводової сенсорної мережі.

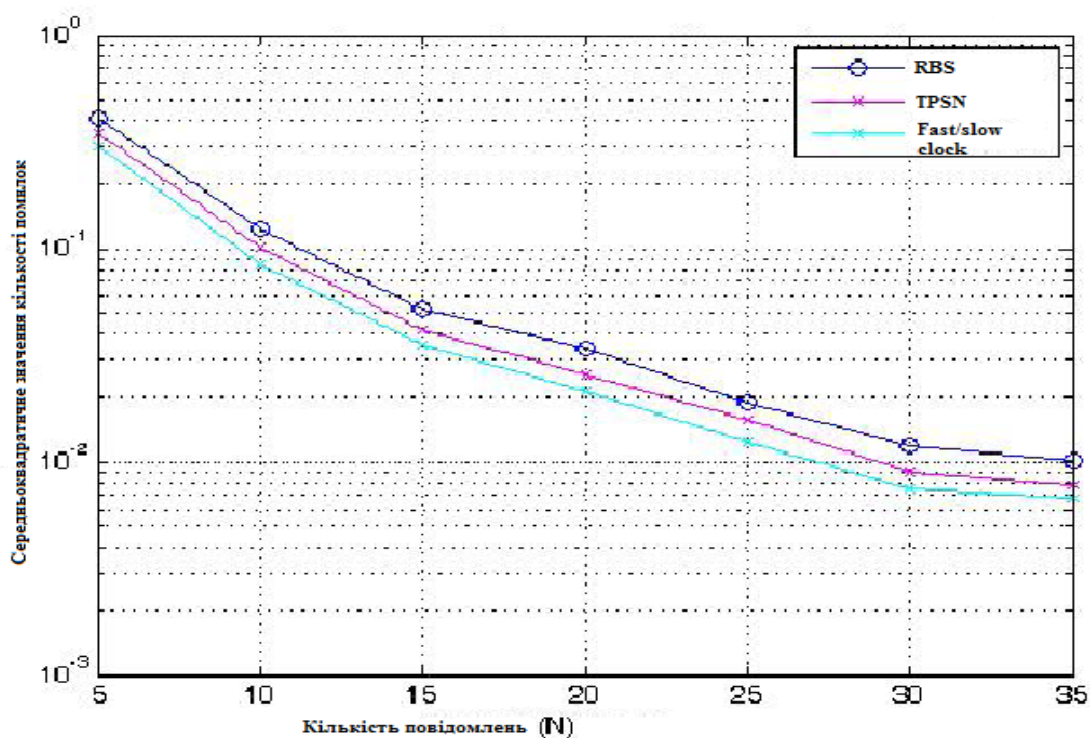


Рис. 5.7. Залежність кількості помилок від кількості переданих повідомлень для різних методів синхронізації

ВИСНОВКИ

Останніми роками увага була зосереджена на безпроводових мережах датчиків через їх широке застосування в різних областях життєдіяльності людини. Серед багатьох труднощів при проектуванні і створенні таких мереж основною проблемою є синхронізація годинників між сенсорними вузлами. Надання загальної тимчасової осі необхідно для великого числа додатків датчиків, тому що дані, які вони повідомляють, повинні бути сфокусовані і точні, щоб надати повну картину об'єкту, події або середовища, за яким ведеться спостереження. Традиційні протоколи синхронізації годинників для проводових мереж не можуть використовуватися, оскільки безпроводові мережеві протоколи датчиків вимагають динамічної адаптації, здатності керувати мобільністю датчиків і масштабованості. Самі датчики сильно обмежені ресурсами через обмежену потужність акумулятора, зарядити який по мірі розрядження або замінити часто буває неможливо в силу сфери застосування БСМ (часто це важкодоступні зони). Крім того, їм необхідно працювати в умовах високих втрат і ненадійності. У даній роботі було поставлено питання важливості проведення синхронізації, обмежень, притиманних БСМ у царині синхронізації; розглянуті фундаментальні підходи та принципи забезпечення синхронізації.

Наведено класифікації протоколів синхронізації часу в БСМ по різним ознакам. Представлено огляд і порівняльний аналіз існуючих тактових протоколів синхронізації, виділено їх переваги та недоліки.

В дисертації розв'язана актуальна наукова задача щодо розвитку метода прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників. Запропоновано, для зменшення швидкості розбіжності локальних годинників сенсорних вузлів, враховувати температурну поправку при розрахунку часових інтервалів, доопрацьовано алгоритм калібрування повільних годинників по швидким. Для усунення розбіжності, що залишається, запропоновано алгоритм підтримки синхронізації в БСМ. Завдяки цьому методу підвищено енергофактивність функціонування БСМ, тим самим збільшено термін служби окремих сенсорних вузлів і мережі в цілому.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. D. Mills, Internet time synchronization: the network time protocol, *IEEE Transactions on Communications*, 39 (1991), 1482–1493.
2. S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. Srivastava, Timing synch protocol for sensor networks, in *Proceedings of 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp. 138–149. ACM, 2005.
3. N. Freris and P. Kumar, Fundamental limits on synchronization of affine clocks in networks, in *Proceedings of 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 921–926. IEEE, 2009.
4. S. Ganeriwal, D. Ganesan, H. Shim, V. Tsiatsis, and M. B. Srivastava, Estimating clock uncertainty for efficient duty-cycling in sensor networks, in *Proceedings of the SenSys*, pp. 130–141. ACM, 2005.
5. J. V. Greunen and J. Rabaey, Lightweight time synchronization for sensor networks, in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 11–19. ACM, 2005.
6. Akyildiz I.F. Wireless Sensor Networks /I.F. Akyildiz// Tutorial at IEEE INFOCOM. — 2005. — March 14.
7. F. Cristian, Distributed counting, in *Probabilistic Clock Synchronization*, pp. 146–158. Springer Verlag, 1989.
8. K. Arvind, Probabilistic clock synchronization in distributed systems, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 5 (1994), 474–487.
9. J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts, in *Proceedings of the 5th Symposium on Operating System Design and Implementation*, pp. 147–163. ACM, 2004.
10. K. Romer, Time synchronization in ad hoc networks, in *Proceedings of ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 173–182. ACM, 2001.
11. J.R.Vig, Introduction to quartz frequency standards, Technical Report SLCETTR-92-1, Army Research Laboratory Electronics and Power Sources Directorate, 1992.
12. K.-L. Noh and E. Serpedin, Pairwise broadcast synchronization for wireless

- sensor networks, in *Proceedings of the IEEE International Workshop: From Theory To Practice in Wireless Sensor Networks*, pp. 1–6. IEEE, 2007.
13. H. Kopetz and W. Ochsenreiter, Clock synchronization in distributed realtime systems, *IEEE Transactions on Computers*, 36 (1987), 933–939.
 14. J. L. Hill and D. E. Culler, Mica: a wireless platform for deeply embedded networks, *IEEE Micro*, 22 (2002), 12–24.
 15. B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey, *Ad-Hoc Networks*, 3 (2008), 281–323.
 16. S. Kunniyur and S. Narasimhan, Modeling the effect of network parameters on delay in wireless ad hoc networks, in *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 341–349. IEEE, 2005.
 17. F. Cristian. Probabilistic Clock Synchronization. *Distributed Computing*, 3:146–158, Springer-Verlag, 1989.
 18. M. Mock, R. Frings, E. Nett, and S. Trikaliotis. Continuous Clock Synchronization in Wireless Real-time Applications. *Proc. 19th IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS-00)*, pp. 125–133, Oct. 2000.
 19. S. Ping. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. *Intel Research, IRB-TR-06- 013*, June 2006.
 20. J. Elson, L. Girod, and D. Estrin. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. *Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002)*, Vol 36, pp. 147–163, 2002.
 21. S. PalChaudhuri, A. Saha, and D. B. Johnson. Probabilistic Clock Synchronization Service in Sensor Networks. Technical Report TR 03-418, Department of Computer Science, Rice University, 2003.
 22. W. Su, I. Akyildiz, Time-Diffusion Synchronization Protocols for Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007.
 23. Q. Li and D. Rus. Global Clock Synchronization in Sensor Networks, *Proc. IEEE Conf. Computer Communications (INFOCOM 2004)*, Vol. 1, pp. 564–574, Hong Kong, China, Mar. 2004.

24. M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003)*, pp. 1266–1273, 2003.
25. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey, *Journal Ad Hoc Networks*, Vol. 7 Issue 3, May, 2009.
26. Коваленко І.Г., Романюк В.А., Діянчук І.М. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ. Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 2 – 2012
http://www.viti.edu.ua/files/rom/2011/4_2011.pdf
27. Fengyuan Gong; Mihail L. Sichitiu. On the Accuracy of Pairwise Time Synchronization, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017
Pages: 2664 – 2677.
28. Ali Al-Shaikhi; Ahmad Masoud. Efficient, Single Hop Time Synchronization Protocol for Randomly Connected WSNs *IEEE Wireless Communications Letters* , 2017, Pages: 170 – 173.
29. Md Asgar Hossain; Md Mukit. Experimental investigation and analysis of clock model and sensor networks agents time synchronization, *International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*, 2015, Pages: 145 - 148
30. Варгаузин В. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / В. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. — 2005. — № 6.
31. Васенин В.А. Математические модели управления трафиком в Интернете: новые подходы на основе схем TCP/AQM / Васенин В.А., Симонова Г.И. // Автоматика и телемеханика. — 2005. — №8.
32. Горяева С.Н. Особенности построения сенсорных сетей / С.Н. Горяева // 2-а міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційні системи. Проліми та тенденції розвитку.»: Зб. матеріалів конференції — Х.: ХНУРЕ, — 2007. — С. 145—146.

33. Коваленко І.Г. Енергозберігаючі методи множинного доступу в безпроводних сенсорних мережах: збірник матеріалів V науково-технічної конференції „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” / – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2010. – С. 141 – 142.
34. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и беспроводных сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // Электросвязь. — 2006. № 6.
35. Минович А.И., Романюк В.А. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей //Зв’язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
36. Алгулиев Р.М. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / Р.М.Алгулиев, Т.Х. Фаталиев, Б.С. Агаев, Т.С. Алиев // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. — 2007. — № 4. — С. 27—32.
37. http://cfm.citizen.co.jp/english/product/cvo_character.html.
38. http://cfm.citizen.co.jp/english/product/cvo_character.html.
39. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS4000.pdf>.
40. GPS Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spgps2008>
41. Esra Saraç, and Selma Ayúe Özel, “An Ant Colony Optimization Based Feature Selection for Web Page Classification,” The Scientific World Journal, vol. 2014, pp. 1–16, 2014.
42. M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colorni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), vol. 26, no. 1, pp. 29-41, Feb 1996.
43. Y. Lu, G. Zhao and F. Su, "Adaptive ant-based dynamic routing algorithm," Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), 2004, pp. 2694-2697 Vol.3.