

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, шкільної комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **Розвиток методів синхронізації в
безпроводових сенсорних мережах**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601ТТ
спеціальності 172 «Телекомунікації та
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

радіотехніка

Олефіренко В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Сільвестров А.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
робототехніки

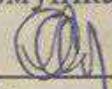
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
автоматики, електроніки та
телекомунікацій


О.В. Шефер
" 04 " 09 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Олефіренку Владиславу Сергійовичу

1. Тема проекту (роботи) **«Розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах»**
керівник проекту (роботи) **Сільвестров А.М., к.т.н., професор**
2. затверджена наказом вищого навчального закладу від " 04 " 09 2023 року № 986
3. Строк подання студентом проекту (роботи) 13.12.2023 р.
4. Об'єкт дослідження: безпроводові сенсорні мережі.
5. Предмет дослідження: розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах.
6. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 1) Вирішення задачі адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог сенсорних мереж.

- 2) Удосконалення моделі БСМ з урахуванням критичних особливостей їх застосування.
- 3) Аналіз та вдосконалення методу прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах із використанням швидких та повільних локальних годинників.
- 4) Проведення імітаційного експерименту для доведення достовірності розвинутих методів.

7. Дата видачі завдання 4.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Квартал	Відсоток	
1	Пошук та опрацювання літератури з теми наукового дослідження. Постановка задачі.	11.10.23		15%	Пл. 1
2	Розгляд та детальне вивчення основних принципів побудови та функціонування безпроводових сенсорних систем.	18.10.23	I	30%	Пл. 2
3	Знаходження шляхів підвищення ефективності синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах.	25.10.23		40%	Пл. 3
4	Аналіз стандартів, які використовуються в персональних, локальних і міських мережах для вирішення завдань БСМ.	14.11.23		50 %	Пл. 4
5	Моделювання режимів роботи безпроводових сенсорних мереж. Пошук можливостей оптимізації режимів роботи сенсорів-складових БСМ.	21.11.23	II	60%	Пл. 5
6	Розробка методу синхронізації	28.11.23		70%	Пл. 6
7	Суть методу	06.12.23		90%	Пл. 7
8	Оформлення магістерської роботи	13.12.23	III	100%	Пл. 8

Магістрант

(підпис)

Олефіренко В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сільвестров А.М.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	8
1.1. Структура існуючих сенсорних мереж.....	8
1.2. Датчики та сенсори	9
1.3. Топології сенсорних мереж та їх основні структурні компоненти	10
1.4. Класифікація безпроводових мереж за масштабом дії	16
1.5. Операційна система.....	18
1.6. Технічні обмеження та складнощі реалізації.....	18
1.7. Відмінності безпроводових сенсорних мереж від традиційних	21
1.8. Енергозбереження в безпроводових сенсорних мережах	22
1.9. Сфери застосування безпроводових сенсорних мереж	26
Висновки до розділу 1.....	27
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	29
2.1. Проблема синхронізації	29
2.2. Важливість синхронізації.....	29
2.3. Вимоги до синхронізації в БСМ	31
2.3.1. Врахування впливу зовнішніх умов	33
2.3.2. Енергетичні обмеження	33
2.3.3. Безпроводове середовище та мобільність	34
2.3.4. Інші обмеження	35
Висновки до розділу 2.....	35
РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БСМ НА ОСНОВІ ГОДИННИКІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ	36
3.1 Годинники в розподілених системах	36
3.2 Визначення годинників.....	37
3.3 Неточності годинників.....	38
3.4 Підходи до синхронізації.....	40
3.4.1 Метод дистанційного зчитування годинників	41

3.4.2 Односторонній обмін повідомленнями.....	42
3.4.3 Двосторонній обмін повідомленнями	
3.4.4 Приймач-приймач синхронізація (RRS)	44
3.4.5 Компоненти затримки в доставці повідомлень	46
3.4.7 Синхронізація лише приймача (ROS)	48
3.4.8 Порівняльна характеристика SRS, RRS та ROS	49
3.5 Вимоги до протоколів синхронізації.....	50
3.6 Класифікація протоколів синхронізації часу.....	50
3.6.1 Концепції забезпечення синхронізації	51
3.6.2 Методи синхронізації відповідно до особливостей мереж	56
Висновки до розділу 3	58
РОЗДІЛ 3 МЕТОД ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКИХ ТА ПОВІЛЬНИХ ЛОКАЛЬНИХ ГОДИННИКІВ	59
4.1 Постановка задачі.....	59
4.2 Основна ідея методу.....	62
4.3 Врахування температурних поправок	63
4.4 Процедура калібрування повільних годинників по швидких	66
4.5 Алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ	68
Висновки до розділу 4	71
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

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

Досягнення в технології бездротового зв'язку, включаючи створення мікросхем, відкрили нові можливості для розробки та розгортання на основі додатків інноваційних систем розподіленого зв'язку, таких як бездротові сенсорні мережі. Різноманітні сфери фізичного світу виграють від гнучкості та адаптивності цих мереж, що робить їх ідеальними для моніторингу та спостереження в різних галузях.

Важливість сенсорних мереж зростає в різних галузях промисловості, де традиційні бездротові мережі більше не функціонують. Причиною цього є наявність різноманітних датчиків і виконавчих механізмів, простота використання, надійність, невеликі розміри та доступність. Крім того, масштаб застосування сенсорних мереж, включаючи їх інтеграцію у великі глобальні системи, значною мірою зумовлений цими характеристиками.

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.

Проблема, що вирішується: забезпечення передачі інформації в бездротових сенсорних мережах з обмеженими енергетичними та обчислювальними ресурсами, зберігаючи хорошу якість передачі даних без впливу на тривалість життя мережі, для покращення передачі даних.

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.

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.

Об'єктом дослідження є безпроводові сенсорні мережі.

Предметом дослідження є розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах.

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.

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 роботі 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 роботою 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.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1. Структура існуючих сенсорних мереж.

Бездротові сенсорні мережі – це самоорганізована мережа з кількох датчиків і виконавчих пристроїв, з'єднаних через стільникові радіоканали. Для опису цього явища використовувався термін «порошинка», що є тією ж назвою, що й мініатюризація. Оскільки повідомлення передаються від одного елемента до іншого, така мережа може охоплювати територію від кількох метрів до кількох кілометрів. Моти зазвичай складаються з мікрокомп'ютерів із саморегулюванням, які працюють від батарейок і приймачів, що дає змогу мотам організовуватися в спеціалізовані мережі та спілкуватися один з одним через радіо. Бездротові сенсорні мережі використовують моти як свій компонент. Таким чином, мережа між вузлами використовується для передачі даних від окремих пристроїв до шлюзу, який потім переміщується на інший більш потужний сервер.

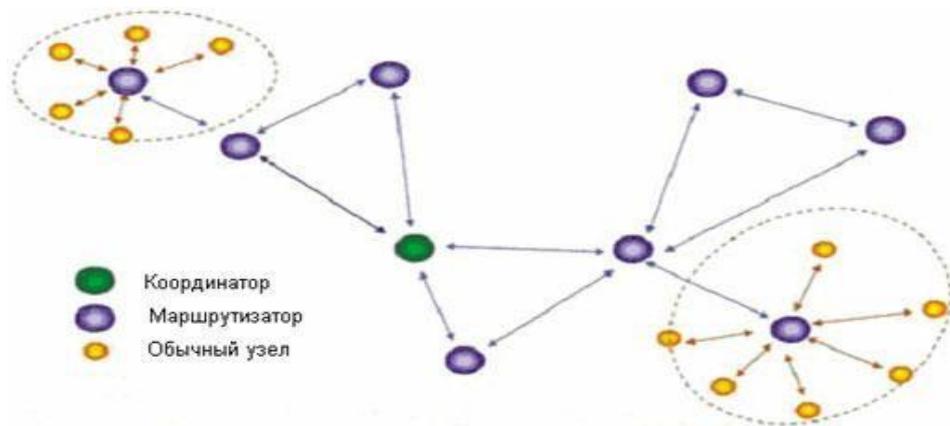


Рисунок 1.1 – Архітектура безпроводової сенсорної мережі\

1.2. Датчики та сенсори

Сенсорна мережа складається з датчиків (mots), які виконують комбінацію вимірювальних, обчислювальних і комунікаційних завдань.

Будь то перетворювач, відповідний датчик або виконавчий механізм, BSM виділяється серед інших систем. З технічної точки зору датчик – це пристрій, який перетворює фізичні параметри в цифрові сигнали, які можна виміряти, проаналізувати та надіслати, наприклад, до метричних систем, контролерів або інших обчислювальних систем. 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. Існують численні способи використання цих пристроїв, що забезпечує значну гнучкість у створенні датчиків і допомагає щоразу вирішувати конструктивну реалізацію датчика та його інтерфейсу з компонентом обробки або передачі.

Порівняно зі старими двигунами, питоме енергоспоживання є відносно низьким і становить 1 мільйон операцій. У цьому контексті попередня обробка даних перед їх передачею стає надзвичайно важливою. Фактом є те, що сучасні ЦПОСи (Цифрові процесори обробки сигналів) мають обчислювальні можливості, які не поступаються персональним ЕОМ. Беручи до уваги важливі частини мережі, ми маємо масивну розподілену обчислювальну систему, яка може розподіляти ресурси для обробки даних для підвищення ефективності. Більшість методів обробки спрямовані на отримання корисної інформації з величезних масивів даних і представлення її в менших обсягах.

Децентралізовані бездротові мережі, відомі як мережі Ad hoc, мають непостійну структуру та використовуються для виконання комунікаційних функцій мотів. Клієнтські пристрої миттєво підключаються, утворюючи

мережу. Метою кожного вузла в мережі є передача даних своїм аналогам. Визначення вузла для надсилання даних є динамічним і залежить від підключення до мережі. Керування потоками даних у дротових і керованих бездротових мережах здійснюється маршрутизаторами або точками доступу, на відміну від цих мереж. Вибір правильного алгоритму маршрутизації є однією з найскладніших проблем, які потрібно вирішити при проектуванні сенсорної мережі. Початковий крок у маршрутизації вимагає координації завдань, які виконують усі вузли мережі. Щоб усунути збоїв вузлів, алгоритм маршрутизації повинен перенаправляти трафік і оновлювати бази даних. Коли зони мережі переповнені, алгоритм маршрутизації повинен мати можливість змінювати маршрути для досягнення оптимальної продуктивності.

Моти в своїй конструкції оснащені джерелами живлення. Сонячні батареї, перетворювачі вібрації та навіть радіовипромінювання на фоні можуть зробити альтернативні джерела енергії ефективними, оскільки вузол BSM потребує малої потужності (50 Вт або менше). Тим не менш, ці джерела все ще досить дорогі, і їх використання вимагає обов'язкової наявності відповідних атрибутів, пов'язаних із зовнішнім середовищем. Електроакумулятори та батареї залишаються найбільш надійними джерелами електроенергії.

1.3. Топології сенсорних мереж та їх основні структурні компоненти

Топологія бездротової сенсорної мережі зазвичай передбачає розташування елементів мережі та їх з'єднання через лінії зв'язку.

Сенсорна мережа може складатися з двох типів фізичних пристроїв, один із повним набором функцій, а інший із меншою кількістю функцій [34], як показано на рис. (рис.1.7): повнофункціонального пристрою (Full Function

Device, FFD) та пристрою з обмеженим набором функцій (Reduced Function Device, RFD).

Повнофункціональні мережеві пристрої мають три режими, а саме координатор, маршрутизатор і кінцевий вузол, тоді як пристрої RFD працюють лише в режимі кінцевого вузла.



Рисунок 1.2 – Типи фізичних пристроїв та їх режими функціонування

Хоча пристрій FFD може спілкуватися з кількома різними FFD, він не може робити те саме з іншими RFD (рис. 1.3), чого не робить пристрій RFD. Завдяки великим обчислювальним ресурсам і достатньому об'єму пам'яті машини FFD дозволяють оцінювати якість каналу зв'язку та вибирати мережевий маршрут.

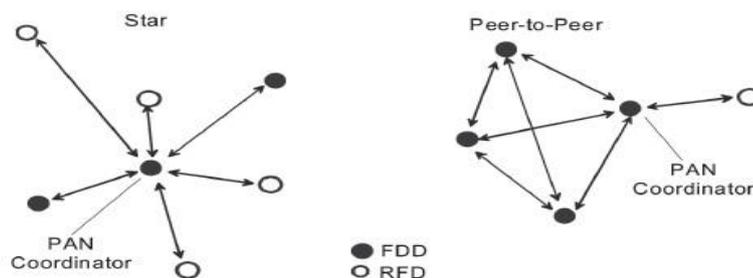


Рисунок 1.3 – Встановлення зв'язку між різними фізичними пристроями сенсорних мереж на прикладі базових топологій

Кінцеві вузли, такі як вузли стаціонарних або мобільних пристроїв з обмеженими функціями та функціями пов'язаними з інформацією, можуть

організувати інтерфейс між периферійним обладнанням і системою. Датчики також використовуються для керування потоком даних.

Робочий пристрій, який називається маршрутизатором, збільшує зону покриття системи та кількість підключених вузлів і може служити кінцевим вузлом у мережі.

Повністю обладнаний пристрій, відомий як координатор, служить шлюзом до зовнішніх мереж передачі даних, таких як Ethernet або GPRS. Координаторам доручено визначити частотний канал і призначити ідентифікатор датчикам, а також зберігати інформацію про структуру системи та вузли, перевіряти наявність нових з'єднань вузлів і керувати номером автентифікації. До координатора підключаються маршрутизатори та кінцеві пристрої з додатковими параметрами конфігурації. Виходячи з методу організації, BSM можна створити за допомогою кількох топологій, які розділені на функціональні розділи:

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

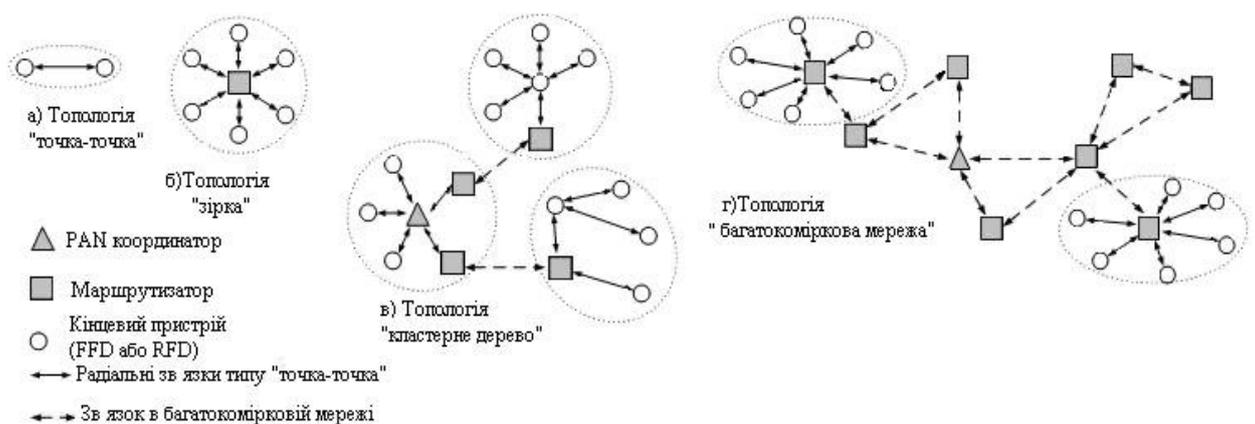


Рисунок 1.4 – Топології сенсорних мереж: а) «точка-точка»; б) «зірка»; в) «кластерне дерево»; г) «багатокоміркова мережа»

Топологія системи «точка-точка» передбачає децентралізовану структуру, що включає однакову кількість мережевих вузлів, де кожен пристрій спілкується із сусіднім вузлом за допомогою кількох релейних з'єднань. У цій системі один або кілька датчиків можна підключити до інших систем (дротових/бездротових і мобільних).

Централізована конфігурація бере на себе роль єдиного маршрутизатора в системі, слугуючи «концентратором» і приймаючи рішення про маршрутизацію агрегованих даних до наступного вузла. В основу топології побудови таких систем покладено тип «зірка».

Ця система централізована. Вона поділена на кластери та має кілька рівнів ієрархії, при цьому координатор розташований на найвищому рівні(рис.1.5).

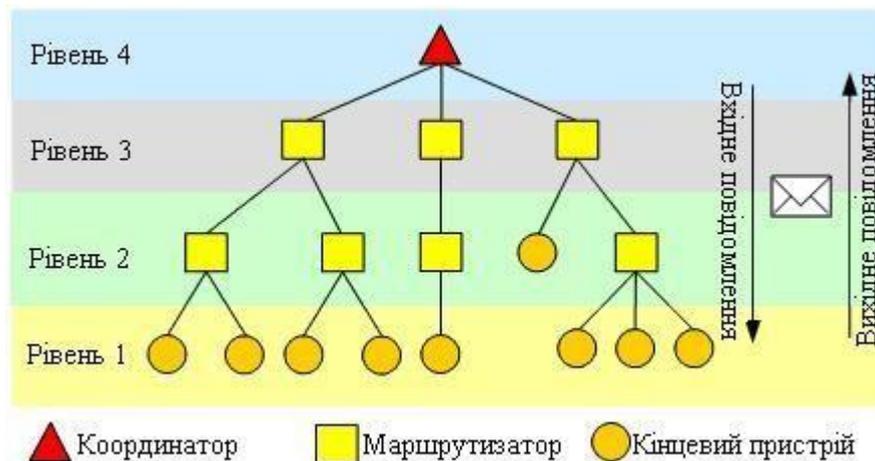


Рисунок 1.5 – Структура ієрархічної чотирьохрівневої сенсорної системи

Кластери – це топологічні системи, які складаються з кількох вузлів. Координатор зберігає дані в концентраторі пам'яті, тоді як група датчиків, які розподілені по різних місцях, передають інформацію координатору. Під час системної фази концентратор пам'яті зберігає дані вимірювань, інформацію про позиціонування та інформацію профілю, одночасно

виконуючи первинну обробку даних. Дані збираються та передаються координатором до центру обробки даних через зовнішній шлюз [32].

Використовуючи ієрархічну архітектуру, BSM відрізняється своєю здатністю обробляти інформацію в централізованих середовищах і використовувати програмовані джерела, які підвищують надійність передачі, вибір топології та масштабування системи. BSM, має чотири рівні ієрархії (рис.1.5).

У цій архітектурі нижній рівень складається з нефункціональних кінцевих вузлів, які відповідають за збір надійної інформації та передачу її без втрати даних на вищий рівень.

Другий етап призначений для збору низхідних потоків, розумної передачі інформації на третій рівень і керування маршрутизацією даних. Пристрої FFD можна використовувати як кінцеві вузли на цьому рівні, і їх можна використовувати як резервні маршрутизатори для підвищення надійності системи та вибіркової в критичних ситуаціях. Ідентифікатори та координати їхньої системи використовуються маршрутизаторами на другому рівні для збору інформації про підключені кінцеві вузли.

Третій рівень включає координатор і базові станції, відповідальні за самоорганізацію BSM, передачу інформації від кінцевих вузлів до зовнішньої мережі та якість передачі необхідної інформації. Третій рівень містить ієрархію підрівнів (наприклад, другий і більш високі рівні передбачають консолідацію потоків в єдиний потік для передачі з різних джерел, тоді як критичні ситуації можуть спричинити збільшення інтенсивності та обсягу переданих даних, що призведе до перевантаження, погіршення якості обслуговування або збою системи. Додатково: в результаті, на рівнях агрегування кількох потоків необхідні методи доступу, які обмежують інтенсивність джерел, а також обмеження трафіку та механізми запобігання перевантаженню системи. Відсутність функціональної вимоги означає, що всі рівні можуть бути виключені.

Поєднуючи принципи децентралізованої та ієрархічної побудови, ця гібридна система дозволяє створити децентралізовану структуру кластерів на двох нижніх рівнях.

Гібридна архітектура пропонує значні переваги з точки зору масштабованості системи, включаючи переваги:

- Ефективна ціна.
- Більше уваги.
- Більша ефективність веде до підвищення надійності.
- Пристрої FFD потребують значної потужності та додаткових ресурсів [30, 36].

Гібридні системи в першу чергу зацікавлені в топології кластерного дерева або багатостільникової мережі з практичної точки зору. Топологія кластерного дерева складається з об'єднаних мереж типу «зірка» з вузлами маршрутизатора на вершині та єдиним координатором кластера. Такі мережі є відносно стійкими до збоїв і змін у топології, оскільки маршрутизатори пропонують вибір шляху та самоорганізацію. Децентралізовані, ієрархічні та гібридні сенсорні мережі можуть розширити своє покриття за допомогою взаємодії.

Вибір BSM-обладнання повинен базуватися на необхідному радіусі зв'язку, щільності датчиків і потужності сигналу, рівні якості обслуговування, шаблонах інформаційних потоків і обсягу даних. Один або два пристрої FFD можна використовувати для підтримки одноточкової системи та забезпечення постійного клімату в різних приміщеннях. При побудові загальної системи збору інформації в медичних школах рекомендується використовувати стільникові структури та створювати кілька «зіркових» мереж у кожному кабінеті для збору вимірювань пацієнтів і передачі даних у відповідні центри зберігання.

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.

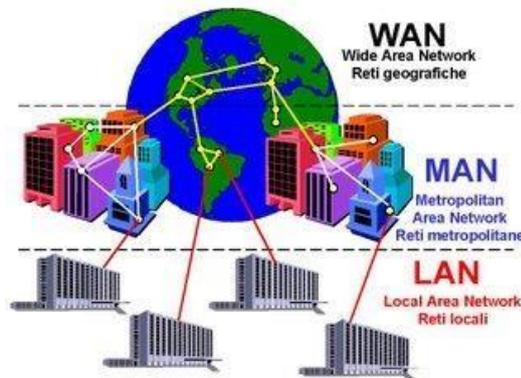


Рисунок 1.6. – Класифікація телекомунікаційних мереж за масштабом дії

Відстань зв'язку між двома користувачами в персональних мережах може становити від 10 м до 100 мм. У системі побудови БСМ вузли мережі PAN класифікуються на першому рівні, а потім піднімаються на другий рівень при розширенні. Мережі використовуються в медицині катастроф для проведення повного обстеження людського тіла та вимірювання складних параметрів, таких як тиск, температура або рівень крові. Безсумнівно, що достовірну інформацію неможливо отримати на центральному вузлі однією лише передачею даних з об'єкта контролю. Велику інформативність несе мультимедійна передача мови, а в деяких випадках відео. Вміст БСМ може

включати дані, мультимедійну інформацію та передачу мови, що потребує використання високошвидкісних каналів.

Міські мережі – це мережі, які охоплюють широку територію, з охопленням від сотень метрів до кількох десятків кілометрів. Сенсорна міська мережа (MAN SN) – це комбінація мереж міського рівня, які можуть передавати лише комбіновані потоки. Він може бути призначений для виконання завдань на верхньому рівні мережі або представляти спеціалізовані мережі з кінцевими вузлами та маршрутизаторами, розкиданими по всьому місту, при цьому він може охоплювати всі рівні його ієрархії. Інформація передається на великі відстані за допомогою MAN-SN і WAN-SN, які об'єднують потоки даних з персональних і локальних мереж.

1.5. Операційна система

Кожен мот оснащено окремою операційною системою для виконання своїх завдань. TinyOS, операційна система, розроблена в Університеті Берклі, зараз використовується в бездротових сенсорних мережах. TinyOS відноситься до програмного забезпечення з відкритим кодом.

Обмежена ємність акумулятора є найважливішим елементом у функціонуванні бездротових сенсорних мереж. Пам'ятайте, що часто неможливо замінити батарейки. Важливо виконати базову первинну обробку на мотах, щоб зменшити обсяг інформації, що передається, і, головне, мінімізувати кількість циклів прийому та передачі даних. Протоколи альянсу ZigBee є найвідомішими прикладами спеціальних комунікаційних протоколів, які були розроблені для вирішення цієї проблеми.

ZigBee використовував стандарт IEEE 802.15.4 для створення стека протоколів для бездротових сенсорних мереж, який включав фізичний рівень і рівень доступу до середовища для низького енергоспоживання, але високої надійності.

ZigBee розробила єдиний стандарт у цій галузі, який підтримується можливістю виробництва повністю сумісного обладнання та програмного забезпечення. Протоколи ZigBee дозволяють пристроям перебувати в режимі сну протягом тривалого періоду часу, що призводить до довшого терміну служби батареї.

1.6. Технічні обмеження та складнощі реалізації

Сенсорні мережі не застраховані від тих самих проблем, з якими стикаються інші розподілені системи, але вони мають свої унікальні складності та обмеження. Ці обмеження впливають на дизайн BSM,

вимагаючи спеціальних протоколів і алгоритмів, яких немає в інших розподілених системах.

Запас енергії, що використовується сенсорними вузлами, є основним обмеженням BSM. Загалом вони призначені для живлення від батарей, які після розрядки потребують заміни або заряджання (наприклад, від сонячної енергії). Вузли підходять не всім. Як тільки у них закінчиться енергія, предмети будуть викинуті. Ця здатність заряджати акумулятор відіграє важливу роль у стратегіях споживання енергії для збору та передачі інформації. У випадку з одноразовими батареями сенсорний вузол повинен функціонувати до кінця своєї місії або до заміни батареї. Тривалість роботи визначається типом програми. Використання датчиків для наукового моніторингу руху льодовика може зайняти кілька років, тоді як для військових операцій може знадобитися лише кілька годин або днів.

Без відповідної інфраструктури чи можливостей обслуговування мережеві системи датчиків у суворих умовах і у віддалених місцях можуть зіткнутися з обмеженнями роботи, які вимагають від вузлів датчиків самоорганізації, керування власними параметрами, взаємодії з іншими датчиками та адаптації до змін навколишнього середовища без втручання людини.

Керування багатьма сенсорними мережами потрібне вручну після розгортання, в результаті чого налаштування, адаптація, технічне обслуговування та ремонт у автономному режимі є нормою. (Serpa and Estrin 2004).

Процес оптимізації передбачає моніторинг і оптимізацію використання внутрішніх ресурсів пристрою. Ця функція самозахисту дозволяє виявляти вторгнення та протидіяти атакам. Крім того, функція самовідновлення дозволяє сенсорним вузлам виявляти, ідентифікувати та реагувати на збої

мережі. Функції самоорганізації в енергозберігаючих сенсорних мережах повинні бути розроблені та реалізовані без значних витрат електроенергії.

Затухання обмежує діапазон радіосигналів, спричиняючи їх згасання під час проходження через середовище та перешкоди. Це відбувається, коли до цих сигналів застосовується послаблення. Використовуючи закон обернених квадратів, можна визначити співвідношення між отриманою та переданою потужністю радіочастотного сигналу.

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

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

Невеликий форм-фактор і низьке енергоспоживання є важливими, що означає, що багато бажаних компонентів, таких як приймачі GPS, не можуть бути інтегровані.

1.7. Відмінності безпроводових сенсорних мереж від традиційних

З наведених прикладів видно, що різні рішення щодо розробки BSM відрізняються від рішень, прийнятих в інших системах і мережах. Таблиця 1.1 висвітлює основні контрасти між традиційними мережами та BSM. Інші проблеми можуть перешкоджати розробці сенсорних вузлів і бездротових сенсорних мереж. Однак може статися зміна топології мережі, коли датчики встановлено на рухомих об'єктах, таких як транспортні засоби чи роботи. Ці системи потребують оперативного налаштування на кількох рівнях.

Таблиця 1.1 Порівняння традиційних мереж і BSM

Традиційні мережі	Безпроводові сенсорні мережі
Загальноцільові; багато додатків	Одноцільові; обслуговують один додаток
Загальні обмеження включають пропускну здатність і затримку; споживання енергії не враховується.	Споживання енергії – головний обмежуючий 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 датчиків є мобільними пристроями, в які вбудовані джерела живлення. 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.

Щоб мінімізувати споживання енергії на вузлах, необхідно застосувати набір методів. БСМ містить загальну класифікацію методів енергозбереження, як пояснюється на рис. 1,7 [35].



Рисунок 1.7 – Класифікація методів енергозбереження вузлів БСМ

Використовуючи стратегії енергозбереження для організації режимів роботи, бездротові сенсорні мережі прагнуть мінімізувати споживання енергії вузлами, спричинене частим відключенням вузлів системи. Іншим підходом є циклічне відключення резервних вузлів протягом тривалого часу. Завдяки збереженню часу автономної роботи ці вузли можна використовувати для заміни неефективних або несправних систем вузлів у майбутньому. Методи, що належать до цього класу, в основному використовуються для вибору кількох вузлів BSM, які не мають критичного значення та можуть бути відключені протягом певних періодів роботи мережі.

Методи сну/пробудження можна використовувати для активації трансиверів на вимогу або за розкладом. Інформація не передається в основний час у мережах, де ефективні методи сну/пробудження за вимогою. У BSM вузли зазвичай перебувають у стані відключених приймачів, що гарантує менше затримок під час переходу до стану передачі. Звичайні методи сну/пробудження дозволяють синхронізувати трансивери всіх вузлів для вмикання через регулярні проміжки часу. Якщо вузол надсилає дані, усі

вузли гарантовано перебувають у режимі отримання в будь-який момент. Це одна з їхніх головних переваг. Для цих методів використання синхронізації є обов'язковим. Передача може початися одночасно між декількома вузлами, коли вони прокидаються, що призводить до зіткнень, які матимуть шкідливий вплив на продуктивність та ефективність мережі[35]. Незважаючи на те, що їх можна модифікувати відповідно до змін у топології системи, ці методи неефективні для мереж низької щільності[26].

Енергоефективні методи множинного доступу(MD) можна класифікувати на планові, позапланові гібридні та багаторівневі методи. По суті, ці методи включають використання різних механізмів доступу, які змінюються в залежності від конкуренції системи. Так метод Z-MAC, як обговорювалося раніше, використовує розподілений алгоритм для розподілу часових інтервалів між вузлами сенсорної системи, щоб вони не повторювалися в межах двох секцій реле. Кожен вузол має карту, яка відображає розподіл слотів відповідно до їхніх «власників» після процесу розподілу. На початку роботи «невласницькі» вузли можуть транслювати на канали інших, якщо буде виявлено їх низьке завантаження. Коли слот виділяється для передачі, «власник» отримує контроль над ним.

Потужність передачі. Метою енергозберігаючого управління потужністю передачі є зниження споживання енергоресурсів шляхом зменшення потужності випромінювання окремих антен вузлів BSM. Збільшення пропускної здатності вузлів збільшує ймовірність передачі пакетів, зменшує час доставки та інформацію про маршрутизацію служби, але вимагає більше енергії від батарей і призводить до високого рівня перешкод між парами вузлів, що призводить до значного зниження продуктивності системи.

Мінімізація обсягу обмінюваних даних. Існує два типи методів зменшення даних. Методи першого класу дозволяють зменшити кількість інформації, вже зібраної вузлами BSM, яка буде передана адресату пізніше.

Другокласні методи спрощують керування енергоефективним збором даних. Принципи збору даних у системі диктують методи на прикладному рівні. Ці методи застосовуються відповідно.

Реалізація мобільності вузлів. Використовуючи мобільність вузлів BSM, можна використовувати методи енергозбереження, щоб мінімізувати повторну передачу повідомлень під час транспортування пристроїв поблизу.

Методи енергозбереження, згадані вище, можуть зменшити використання джерела енергії BSM. наприклад Застосування ряду стратегій енергозбереження залежить від робочих параметрів BSM.

1.9. Сфери застосування безпроводових сенсорних мереж

Віддалені медичні послуги можна отримати за допомогою інтеграції мультимедійних систем 3G/4G з медичними сенсорними мережами в охороні здоров'я. Параметри, пов'язані з пацієнтом, такі як температура тіла, показники кров'яного тиску та частота пульсу, контролюватимуть медичні датчики. Віддалені медичні центри також можуть запропонувати дистанційний моніторинг пацієнтів за допомогою датчиків відео та звуку або датчиків позиціонування/активності, щоб надати додаткову інформацію про їхню поведінку та стан здоров'я.

Екологічний моніторинг та контроль навколишнього середовища передбачає акустичних і відеосигналів, які вимагають негайної дії. Щоб ідентифікувати мілини, океанографи вже використовували для цього масиви відеосенсорів, як пояснюється в [36].

Моніторинг об'єкта включає системи безпеки та контролю доступу, відстеження переміщень, виявлення аварій та протипожежний захист. 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.

Моніторинг дорожнього руху у великих містах або на автомагістралях може бути досягнутий за допомогою систем керування дорожнім рухом і систем відстеження вантажів, які дозволяють розгортати службу для запобігання заторів. Використання мультимедійних датчиків в інтелектуальній системі паркування забезпечить мобільність у містах шляхом визначення вільних місць. Використання мультимедійних датчиків може регулювати транспортні потоки та надавати цінні дані, такі як середня швидкість і кількість трафіку, а також здатність виявляти порушення правил дорожнього руху.

Використання сенсорних мереж може забезпечити моніторинг сільськогосподарських угідь для посівів, садівництва та тваринництва. Використовуючи інтегровану мережу датчиків, можна спостерігати за дозріванням кожної лози у винограднику та постійно контролювати рівень температури/вологості. Потім можна проаналізувати, яке поєднання погодних умов дає ту або іншу якість вина.

Під час надзвичайної ситуації бездротова сенсорна система, встановлена в десятиметрових будівлях, розташованих у промисловій зоні міста, може надати пожежникам детальну інформацію про причину та місце пожежі. Вона також відстежує можливі шляхи поширення полум'я та допомагає рятувати постраждалих та їх евакуацію з небезпечних зон.

Системи захисту та безпеки пропонують широкий спектр можливостей для військового сектору, а також захищають активи та робочі місця від крадіжки або несанкціонованого доступу.

Використання BSM на виробництві може допомогти підтримувати стандарти безпеки та комфорту, а також полегшити управління складським обліком та контроль матеріальних запасів.

Висновки до розділу 1

Сенсорні мережі, які постійно розвиваються та вдосконалюються, мають важливе значення для функціонування інформаційного суспільства та дозволяють контролювати різні процеси в масштабах галузі. Пасивні датчики надають додаткові послуги, крім вимірювання значення контрольованого параметра, тоді як активні датчики пропонують значні переваги. Бездротові сенсорні системи (БСМ) зараз широко доступні як у мобільних, так і у віддалених середовищах завдяки еволюції сенсорних мереж, що призводить до збільшення можливостей застосування.

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 проєктів (наприклад, Інтернет речей IoT), в основному, знаходиться в стадії розробки.

РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ СПОСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Проблема синхронізації

Управління значними відмінностями в логічних годинниках між комп'ютерами в розподілених системах є однією з найскладніших проблем у комп'ютерній інженерії. У конструкції більшості комп'ютерних годинників є два фундаментальних аспекти: джерело частоти та накопичувальний механізм для перехоплення тактового сигналу разом із програмованими лічильниками. Різні операційні системи та апаратні платформи мають різні способи реалізації комп'ютерних годинників.

Помилки синхронізації в основному викликані некомпенсованим кварцевим генератором і тактовими імпульсами, які виробляються. Теоретично синхронізація годинників може відбуватися, коли зсуви двох тактових станцій рівні, а джерела частоти працюють з однаковою швидкістю. Тим не менш, на практиці годинники калібруються з мінімальною точністю, а джерела частоти працюють з дещо іншими темпами. Крім того, такі фактори, як початкові виробничі допуски, старіння, температура, тиск та інші можуть впливати на частоту кварцевого генератора. Синхронізація розподілених годинників необхідна для подолання нестабільності.

2.2. Важливість синхронізації

Загальне розуміння часу в розподіленій системі досягається за допомогою процесу, відомого як координація часу. BSM має виконувати кілька основних завдань, таких як:

- Злиття даних, часове впорядкування повідомлень[2].

Синхронізація повідомлень вимагає спільного використання спільного часу між деякими або всіма вузлами мережі. У момент події показання датчика

мають бути оброблені більшістю алгоритмів об'єднання даних. Значна різниця в затримках повідомлень у сенсорних мережах означає, що розподілені сенсорні вузли можуть отримувати повідомлення не в тому порядку, в якому вони надійшли до одержувача.

- Управління живленням. Розробка BSM повинна враховувати енергоефективність, оскільки датчики часто залишаються без нагляду та обслуговування після розгортання, що ускладнює заміну батарей протягом терміну їх служби. Синхронізація часу є важливим аспектом більшості енергозберігаючих операцій. Регулярні цикли, які керують режимами сну та пробудження, дозволяють вузлам споживати мінімальну кількість електроенергії в режимі сну, що призводить до значної економії енергії.

- Планування передачі. Декілька протоколів планування вимагають тимчасової координації. Синхронізована мережа є єдиним місцем, де можна використовувати множинний доступ з розподілом часу (TDMA), що робить її однією з найпопулярніших схем зв'язку для розподілених мереж.

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

Сенсорні мережі можуть контролювати одне фізичне явище з багатьма вузлами. Консолідація спостережень в єдине ціле є однією з ключових функцій синхронізації з відповідними сенсорними мережами. Об'єднання даних значною мірою залежить від часу. Коли датчики здатні виявляти об'єкти лише в безпосередній близькості, вони можуть надавати інформацію про додаткові фактори, такі як швидкість і розмір об'єкта, інтерполюючи дані з кількох вузлів.

Апроксимація швидкості рухомого об'єкта може бути визначена фактором просторових відстаней і часу між двома послідовними спостереженнями об'єкта різними сенсорними вузлами. Оскільки багато фізичних явищ можуть відбуватися за короткий час, одна з функцій поділу датчиків на групи (де кожна група представляє лише одне фізичне явище) у

базових системах полягає в тому, щоб поділити їх разом як частину інтегрованої мережі датчиків. Тимчасові зв'язки між сенсорними вузлами важливі для розділення.

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

Проблема синхронізації часу є значним науковим викликом при проектуванні енергоефективних BSM.

2.3. Вимоги до синхронізації в BSM

Існуючих методів хронометражу в BSM недостатньо по ряду факторів. Висока енергоефективність є вимогою для сенсорних мереж через припущення, що вузли в BSM є некерованими та мають обмежену доступність заряду акумулятора. Сучасні підходи до синхронізації часу не враховують це обмеження. Використання споживання смуги пропускання в протоколах NTP є консервативним і неефективним для пристроїв, які споживають багато енергії навіть під час пасивного прослуховування радіохвиль.

При визначенні вимог до бездротових сенсорних мереж важливо враховувати деякі показники:

- точність, яка визначається як різниця в групі вузлів BSM або максимальне значення похибки відносно зовнішніх стандартів;
- тривалість роботи сенсорного вузла, що може варіюватися від стабільної синхронізації протягом тривалого періоду, коли мережа активна, до майже миттєвої (вигідно, наприклад, коли вузлам потрібно порівняти час виявлення певної події);
- масштабованість та доступність - набір вузлів, які синхронізовані і повністю охоплюють певний регіон;

- Ефективність, що досягається за рахунок витрат часу та енергії.
- вартість і форм-фактор - можуть мати вирішальне значення в мережах, які включають тисячі малих автономних сенсорних вузлів.

Запропоновані на даний момент методи синхронізації часу є компромісними рішеннями, які не можуть бути оптимальними в кожному сценарії. Можна синхронізувати GPS-приймачі користувачів із стандартом точного часу 200 нс [5]. Проте, GPS пристрої часто не можуть бути використані (наприклад, під водою), а синхронізація може тривати кілька хвилин. У певних ситуаціях 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. Ця форма синхронізації доступна лише на прикладному рівні, і її точність обмежена двома факторами: змінною затримкою в радіоприймачах і затримкою 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 групі сусідніх сенсорних вузлів. Повинно бути така ж точна часова позначка, як і частота подій, яка може коливатися від десятків до сотень мілісекунд. Заповнення даних має бути комплексним і тривалим, навіть для проміжних вузлів, оскільки вони можуть подолати значну відстань по мережі.

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

Температура, тиск і вологість можуть впливати на швидкість ходу годинника. На відміну від дротових комп'ютерів, бездротові датчики зазвичай знаходяться в суворих умовах, де переважають коливання характеристик середовища.

В умовах контролю частота осцилятора може змінюватися до 3 мд (відхилення в 1 мм є помилкою приблизно в 1 секунду кожні 12 днів) в результаті коливань температури, які були зареєстровані (Mills 1998). Вузли зовнішнього датчика, які є недорогими, можуть демонструвати сильніші зміни.

2.3.2. Енергетичні обмеження

Бездротові сенсорні вузли, як правило, живляться від обмеженої енергії, якою можуть бути одноразові або акумуляторні батареї (наприклад, сонячні панелі). Якщо батареї замінені, вартість БСМ може бути непомірно високою, особливо якщо пристрої розташовані в місцях, які потребують технічного обслуговування. Протоколи синхронізації часу не повинні суттєво впливати на енергоспоживання бездротових вузлів, щоб забезпечити тривалий час автономної роботи. Енергоефективні протоколи синхронізації часу повинні націлюватися на мінімальну кількість повідомлень для досягнення синхронної поведінки вузлів, оскільки зв'язок між вузлами датчиків зазвичай є основою для синхронізації часу.

2.3.3. Безпроводове середовище та мобільність

Відомо, що бездротове середовище є дуже мінливим і на нього можуть впливати зміни в характеристиках навколишнього середовища через такі фактори, як дощ, туман, вітер і температура (Otero et al. 2001). Через ці коливання бездротові сенсорні вузли піддаються більшим обмеженням пропускної здатності мережі, частоті помилок і радіоперешкодам. Вузол А може отримувати повідомлення від вузла В, тоді як повідомлення, надіслані вузлом А, занадто слабкі, щоб їх можна було правильно інтерпретувати. Це ускладнює канал зв'язку від центрального датчика програми до інших вузлів, що призводить до асиметричних затримок зв'язку. Характеристики каналу також суттєво відрізняються при безпосередньому застосуванні один від одного. Перешкоди зв'язку в бездротових мережах визначаються щільністю мережі, дальністю зв'язку та частотою наявних бездротових пристроїв, а також рівнем активності цих пристроїв. Багато бездротових датчиків є портативними, як-от ті, які встановлені в автомобілях або перевозяться людьми, що може спричинити значні та негайні зміни в топології та якості зв'язку. Нарешті, сенсорні вузли можуть вийти з ладу або виснажувати свою енергію, вимагаючи синхронізації часу для нормального функціонування, незалежно від поведінки мережі чи щільності. Через ці проблеми протоколи синхронізації часу повинні бути надійними та гнучкими.

2.3.4. Інші обмеження

Протоколи синхронізації часу повинні мати невелику вагу, а також мати обмеження по енергії, які виникають через низьку вартість і низьку потужність вузлів датчиків, які обмежені як з точки зору швидкості процесора, так і пам'яті. Через невеликі розміри та вартість сенсорних пристроїв неможливо досягти синхронізації за допомогою дорогого та громіздкого обладнання, наприклад приймачів GPS. Розробка протоколів синхронізації часу повинна бути ресурсомісткою, щоб забезпечити мінімальну вартість сенсорного пристрою. З поширенням бездротових сенсорних мереж протоколи синхронізації повинні добре масштабуватися відповідно до кількості вузлів або зростання щільності мережі. Зрештою, різні застосування датчиків вимагатимуть різного ступеня точності годинника. Програму відстеження об'єктів можна створювати за допомогою впорядкованого та прямолінійного повідомлення без необхідності використання зовнішніх опорних 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 розглядалися труднощі управління часом у бездротових сенсорних мережах, підкреслювалась його важливість і пояснювалось його ефективність. Повне використання BSM вимагає координації часу внаслідок різних факторів, таких як енергоспоживання (синхронний перехід із сплячого режиму в активний режим), збір інформації та передача даних до центру керування.

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

3.1 Годинники в розподілених системах

Перш ніж обговорювати специфіку синхронізації з годинниками в бездротових сенсорних мережах, варто визначити саме поняття годинника. Комп'ютерний годинник - це електронний пристрій, який враховує коливання в точно обробленому кристалі кварцу з певною частотою. Він також визначається як група апаратних і програмних компонентів, які пропонують точну, надійну та послідовну функцію часу для операційної системи та її клієнтів.

Комп'ютери виконують функцію як пристрої відліку часу. 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 Визначення годинників

Почнемо з основних визначень, які є ключовими для подальшого розуміння синхронізації годинників у безпроводових сенсорних мережах (БСМ). Використовуючи приклад двох годинників, позначених як S_A і S_B , розглянемо наступні терміни:

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

Частота: Частота представляє швидкість прогресу годинника. Частота в момент часу t годинника S_A позначається як $C'_A(t)$.

Зміщення: Зміщення годинника - різниця між часом, вказаним годинником, і реальним часом. Зміщення годинника S_A визначається як $C_A(t) - t$.

Зміщення між годинниками: Зміщення годинника S_A відносно S_B в момент часу t визначається як $C_A(t) - C_B(t)$.

Переки: Переки годинників - різниця в частотах між реальними та ідеальними годинниками. Переки годинника S_A відносно годинника S_B в момент часу t визначається як $(C'_A(t) - C'_B(t))$.

Дрейф: Дрейф годинника S_A - друга похідна від значення годинника по часу, позначається C''_A . Дрейф годинника S_A відносно годинника S_B в момент часу t рівний $(C''_A(t) - C''_B(t))$.

Зазначте, що параметри годинника, такі як частота генератора і порогове значення, визначають роздільну здатність годинника. У реальних умовах годинники сенсорних вузлів мережі мають свої унікальні параметри синхронізації, зокрема, частота може досягати до 40 частин на мільйон (ppm).

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

В контексті безпроводових сенсорних мереж, точність годинників є важливим аспектом, що впливає на надійність і ефективність системи. Зазвичай апаратне забезпечення годинників не є абсолютно точним, оскільки частота, що визначає час, ніколи не може бути абсолютно точною. Навіть невелике відхилення частоти, таке як 0,001%, може призвести до помилки в годиннику приблизно однієї секунди за день. Ця точність часто вимірюється в дуже малих одиницях, такі як один PPM (Part Per Million).

Тактова частота вказує на швидкість, з якою йде годинник, а розфазування синхронізуючих імпульсів представляє різницю в частотах двох годинників. Ідеальний годинник повинен мати тактову частоту, що постійно дорівнює $dC/dt = 1$. Однак фактичні умови впливають на фактичну тактову частоту. Температурні зміни, вологість, напруга живлення та вік кварцового кристала є факторами, які впливають на швидкість відхилення годинникової частоти від ідеальної, що виражається як $(dC/dt - 1)$.

Максимальна швидкість відхилення годинників визначається як ρ , зазвичай в діапазоні від 1 мд до 100 мд ($1 \text{ мд} = 10^{(-6)}$). Це визначає межі, в яких годинники можуть бути точними, швидкими або повільними. Швидкість відхилення визначає невідповідність в показаннях годинників сенсорних вузлів, що вимагає періодичної ресинхронізації для корекції параметрів синхронізації.

Припускаючи ідентичні годинники, два синхронізованих годинники можуть відхилитися один від одного із швидкістю не вище $2\rho_{\max}$. Щоб обмежити відносне зміщення до δ секунд, інтервал ресинхронізації (τ_{sync}) повинен відповідати вимогам:

$$\tau_{\text{sync}} \leq \frac{\delta}{2\rho_{\max}} \quad (3.1)$$

Підкреслимо, що функція $C(t)$ повинна бути кусково-безперервною, що вимагає поступового коригування годинників, щоб уникнути раптових стрибків у показаннях, які можуть призвести до неочікуваних наслідків, особливо у випадку таймерів і подій, запланованих на конкретний час.

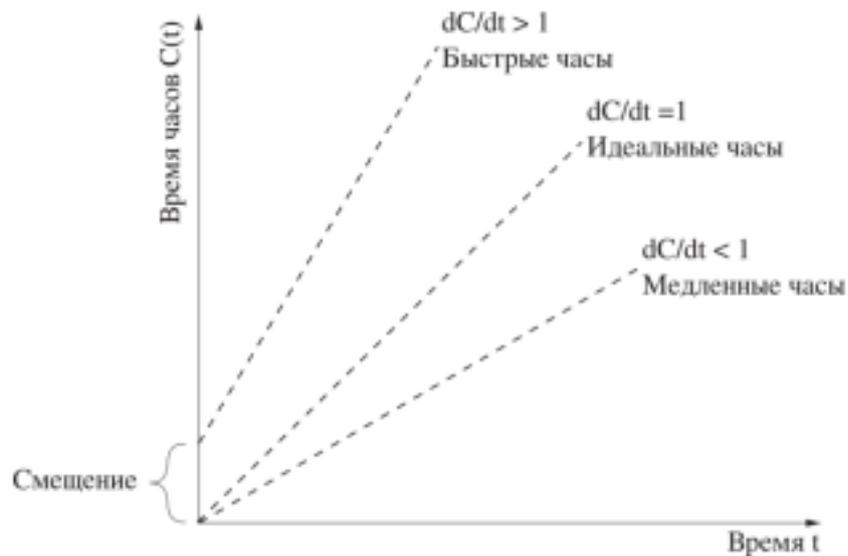


Рисунок 3.1 – Зв'язок між локальним часом $C(t)$ і реальним часом t .

3.4 Підходи до синхронізації

У розгляді методів синхронізації годинників у безпроводових сенсорних мережах визначаються два ключові підходи: синхронізація передавач-приймач (SRS) та приймач-приймач синхронізація (RRS). Обидва підходи використовують принципи пакетної синхронізації, але їхні методи взаємодії між вузлами відрізняються.

Синхронізація передавач-приймач(SRS). Цей підхід ґрунтується на двосторонньому обміні повідомленнями між вузлами. Такі протоколи, як NTP та TPSN, використовують SRS, заснований на серії парних синхронізацій, включаючи обмін повідомленнями у режимі двосторонньої синхронізації.

Приймач-приймач синхронізація (RRS). Коли пакет маяка надсилається із синхронізованих вузлів у RRS, він отримується від того самого відправника. Відносні зсуви годинника обчислюються шляхом порівняння часу прийому сигналів радіомаяка. RRS формує основу для протоколу RBS, який передбачає обмін повідомленнями між дочірніми вузлами для врахування їх відносних зсувів годинника.

Також було запропоновано новий підхід до синхронізації часу, званий синхронізацією тільки з приймачем (ROS). Новий підхід пропонує мінімізацію кількості необхідних повідомлень часу і енергоспоживання під час синхронізації при збереженні високої точності. Цей метод може бути ефективним для мереж з меншим обсягом тимчасових повідомлень, порівняно з іншими протоколами, такими як TPSN і RBS.

Сенсорні мережі зазвичай покладаються на обмін повідомленнями між вузлами для синхронізації годинника. 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

У сучасних безпроводових мережах синхронізація годинників між вузлами часто виконується через обмін повідомленнями, що дозволяють кожному вузлу оцінювати час у годиннику іншого вузла. Важливою задачею є ефективність протоколу синхронізації, особливо в умовах недетермінованих і необмежених затримок повідомлень, які можуть довільно затримуватися, ускладнюючи процес синхронізації.

Cristian визначив метод читання віддалених годинників, який обробляє необмежені затримки повідомлень між процесами [17]. Його метод дистанційного зчитування годинників став популярним завдяки здатності працювати з необмеженими затримками повідомлень. Основна ідея цього методу полягає в тому, щоб дозволити процесу оцінити час віддаленого процесу і коригувати свій годинник відповідно.

Процес зчитування віддаленого годинника виглядає наступним чином:

- 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 .
- 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.

Недоліками цього методу є варіабельність часу передачі повідомлень через мережевий трафік і маршрутизацію, що робить вимірювання точного часу важким та непередбачуваним. Крім того, висока складність протоколу в термінах кількості обмінів повідомленнями ускладнює його практичне застосування, не надаючи чітких рекомендацій для визначення кількості спроб для досягнення точної синхронізації.

3.4.2 Односторонній обмін повідомленнями

Попарна синхронізація є основним методом керування часом, коли два вузли використовують принаймні одне синхронне повідомлення для узгодження своїх годинників. Щоб досягти синхронізації по всій мережі, можна повторити цей процес між декількома вузлами, поки всі вони не налаштують свої годинники.

Коли два вузли синхронізуються за допомогою одного повідомлення, найпростіший метод попарної синхронізації показаний на рис.3.3 у лівому стовпці з прикладом, коли один вузол надсилає мітки ожеледиці іншому вузлу. Повідомлення для синхронізації надсилається вузлом i до j у момент часу t_1 і містить мітку часу. Позначка часу t_2 надсилається до вузла j з його локального годинника після отримання цього повідомлення. Розбіжність у двох мітках часу є мірою зміщення годинника (між вузлами i та j годинників), яке позначається як. Іншими словами, різниця між двома часами описана нижче.

$$(t_2 - t_1) = D + \delta \quad (3.2)$$

де D - це невідомий час проходження. Незважаючи на незначний час проходження (кілька мікросекунд) у бездротовому середовищі, його часто не помічають або вважають незмінним. Варто зазначити, що вузол j може

використовувати цей метод для обчислення зміщення та модифікації свого годинника відповідно до вузлів.

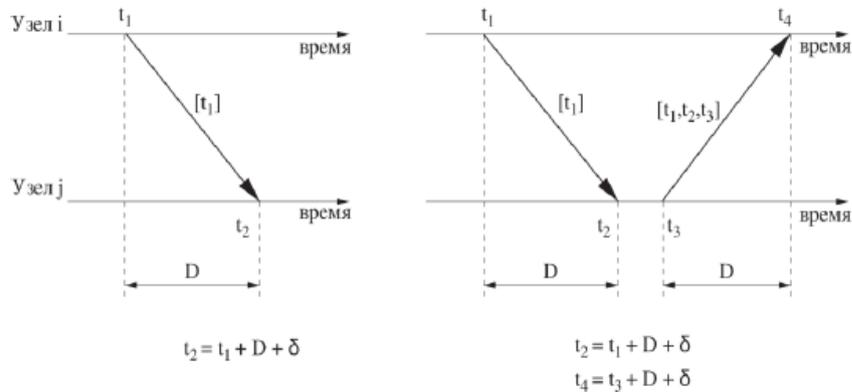


Рисунок 3.2 – Концепція попарної синхронізації.

3.4.3 Двосторонній обмін повідомленнями

Трохи точніший метод полягає у використанні двох повідомлень синхронізації, як показано в правій колонці рис.3.3. Вузол j є місцем призначення для повідомлень, які були надіслані в момент часу T_3 і мають мітки часу t_1 , t_2 і t_3 . Після отримання другого повідомлення в момент часу t_4 обидва вузли повинні визначити зсув годинника, який повинен бути встановлений на певне значення для затримки транзиту. Більш точний розрахунок транзитної затримки та зміщення тепер може бути виконаний вузлом i.

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)

Принцип синхронізації одержувача-одержувача використовується протоколами, що передбачає забезпечення того, щоб одне й те саме повідомлення надходило до кожного одержувача у відповідний час. Більшість схем синхронізації не використовують традиційний метод передавача-приймача, який не є точним. Одержувачі в широкомовних середовищах отримують повідомлення в однаковий час, а потім використовують свій час прийому для обчислення зміщення, наприклад, шляхом обчислення різниці між їхніми годинниками. Така схема показана на рис.3.4. Якщо присутні два приймачі, вони повинні бути синхронізовані з трьома повідомленнями. Прикладом цього підходу є протокол RBS. Зауважте, що широкомовне повідомлення не містить мітки часу, а скоріше час надходження трансляції в кожен інший приймач, який буде використовуватися як час синхронізації для різних приймачів.

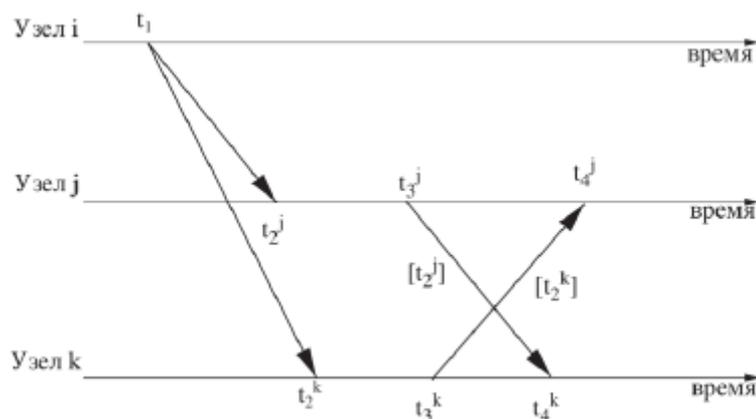


Рисунок 3.3 – Метод синхронізації приймачів.

Основна перевага цього методу полягає в тому, що він усуває всі недетерміновані компоненти затримки на стороні передавача (час надсилання та час доступу). Рисунок 3.4 ілюструє загальну затримку, яку

відчувають повідомлення синхронізації, яка підсумовується як сума кількох компонентів (Kopetz and Ochsenreiter, 1987), як показано на рисунку 3.4.

Висока точність синхронізації може бути досягнута за допомогою підходу приймач-приймач.

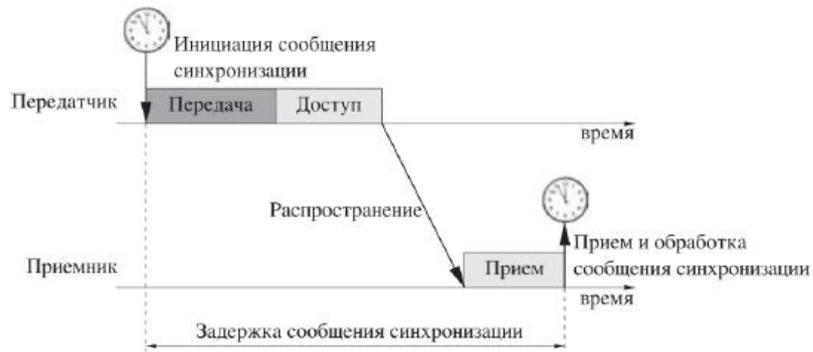


Рисунок 3.4 – Двостороння затримка при передачі повідомлення синхронізації.

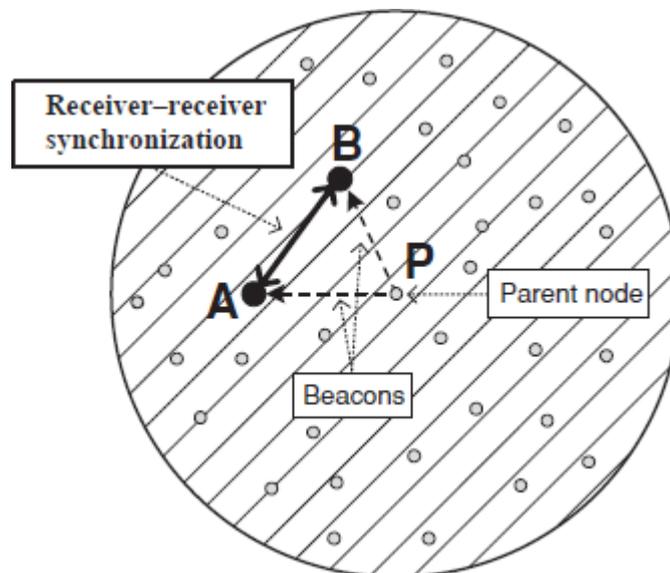


Рисунок 3.5 – Синхронізація приймач-приймач

3.4.5 Компоненти затримки в доставці повідомлень

Основним завданням синхронізації часу в розподілених мережах є гарантія рівномірного часового покриття для всіх мережевих вузлів і точна часова координація між усіма членами вузла, залученими як до спільної, так і до розподіленої взаємодії з фізичним світом. Різниця в часі в основному спричинена різним часом встановлення вузлів і змінами часу, створеними локальними генераторами, що працюють на різних частотах.

Непередбачуване спрацьовування локальних тактових генераторів також спричинене змінами навколишнього середовища, такими як температура та старіння. Ці невизначеності призводять до дрейфу локальних годинників різних вузлів протягом усього часового інтервалу. Припустимо, що два вузли необхідно синхронізувати один з одним. Якщо повідомлення надсилаються негайно на сусідній вузол без затримки, годинник сусіда знатиме, що він не ідентичний годиннику між ними. На жаль, у автентичній бездротовій мережі WIF багаторазові затримки впливають на доставку повідомлень, через що синхронізація часу виглядає складнішою, ніж здається.

Загалом, для оцінки відносних зсувів часу між вузлами потрібна серія передач тимчасових повідомлень. У бездротових сенсорних мережах синхронізацію часу можна розглядати як спробу позбутися недетермінованих затримок у надсиланні тимчасових повідомлень по радіохвилях. У випадку повідомлень, що передаються між вузлами, є кілька випадків невизначених затримок. Структуру затримки повідомлення вперше дослідили Kopetz і Ochsenreiter і охарактеризували компоненти затримки відповідно до процесу доставки повідомлень [13]. Компоненти затримки в доставці повідомлень можна класифікувати в такий спосіб:

1. Час відправки: тривалість, необхідна для створення повідомлення на рівні програми, а також інші затримки, які операційна система створює під

час обробки запиту на надсилання. Час, витрачений на надсилання, залежить від робочого навантаження системи та може досягати сотень мілісекунд.

2. Час доступу: тривалість очікування доступу до каналу після досягнення рівня MAC. Це основний фактор і сильно відрізняється в залежності від конкретного протоколу MAC. Час, який змінюється від мілісекунд до секунд, не є фіксованим і залежить від поточного мережевого трафіку.

3. Час передачі: час передачі повідомлення фізичного рівня. Затримка оцінюється в десятки мілісекунд, що можна визначити довжиною повідомлення та швидкістю радіозв'язку поблизу.

4. Час поширення: Час, необхідний для надсилання повідомлення від відправника до одержувача через. Порівняно з іншими компонентами затримки, час поширення зазвичай становить менше 1 мікросекунди і залишається детермінованим. Однак він все ще відносно невеликий.

5. Час прийому: час отримання повідомлення пропорційний тривалості передачі на стільниковому рівні. У деяких випадках у час прийому включалася затримка.

6. Час опрацювання після прийому: період, необхідний для розробки та передачі прикладного рівня в приймач. Компонент на стороні передачі, подібний до часу надсилання на передавач, може піддаватися змінним затримкам від їхніх операційних систем, що впливає на його синхронізацію.

Додаткові змінні, такі як апаратна платформа, код виправлення помилок і схема модуляції, також можуть впливати на час затримки повідомлення. Платформа MICA відображає розрахункову затримку часу для кожного компонента, як згадувалося раніше [14]. Компоненти нижчого або більшого розміру використовуються в багатьох схемах синхронізації BSM за допомогою методів низького рівня. Тимчасові ярлики рівня MAC можна використовувати для зменшення затримки надсилання та отримання, наприклад, у відправника та одержувача.

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 рисунку 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 В також може бути синхронізований з батьківським вузлом Р без додаткових передач часу. Цей підхід називається синхронізацією тільки приймача (ROS).

Загалом, всі сенсорні вузли, що знаходяться в заштрихованій області на рисунку 3.7, можуть бути синхронізовані тільки шляхом прийому повідомлень про час через підхід ROS. Тут вузол Р і вузол А можна розглядати як суперноди, оскільки вони забезпечують маяки синхронізації для всіх вузлів, розташованих в їх околиці.

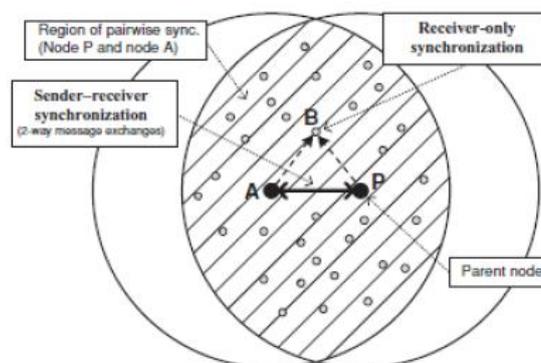


Рис. 3.6 Передавач-приймач синхронізації і лише приймач синхронізація

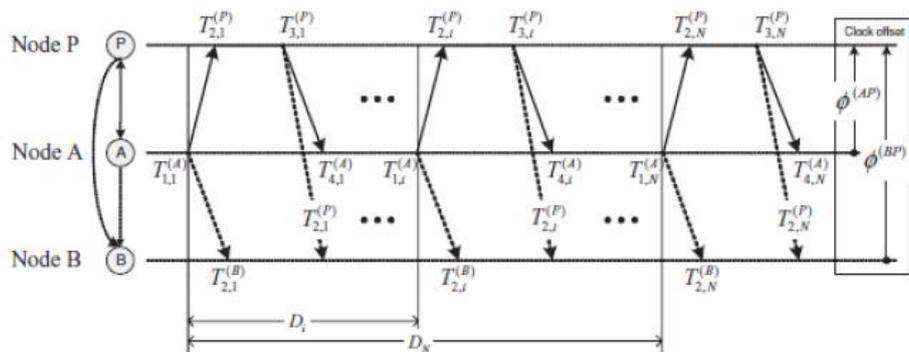


Рис 3.7 Моделі синхронізації ROS та SRS

3.4.8 Порівняльна характеристика SRS, RRS та ROS

Вплив компонентів затримки, пов'язаних з операційною системою, можна усунути шляхом вимірювання SRS безпосередньо на фізичному рівні. Це значно зменшує ймовірність затримки в доставці повідомлення. І навпаки, RRS не враховує недетерміновані компоненти затримки, такі як час надсилання та доступу на стороні приймача.

Використовуючи платформу Berkeley mote [2], експериментально показано, що SRS має вищу точність у синхронізації (помилки), ніж RRS 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 ROS не дає жодних переваг у точності синхронізації, він значно зменшує енергію, необхідну мережі для досягнення цього, зменшуючи кількість синхронних повідомлень.

3.5 Вимоги до протоколів синхронізації

Присутні такі 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 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. Оптимізувати протокол для всіх цих вимог одночасно складно через складність BSM. Завдяки компромісам, пов'язаним із задоволенням цих вимог, кожен протокол розроблений таким чином, щоб розрізняти різні вимоги. Протоколи синхронізації часу можна класифікувати на різні типи залежно від критеріїв:

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

3.6.1 Концепції забезпечення синхронізації

Підпорядкована (ведучий-ведений) в порівнянні з рівноправною:

Синхронізація головного підлеглого. У протоколі головного підлеглого один вузол позначається як провідний, тоді як інші вузли розглядаються як підлеглі. Підлеглі вузли використовують показання локального годинника хоста як контрольний час і намагаються координуватися з хостингом. Загалом головний вузол споживає ресурси процесора пропорційно до кількості підлеглих, і він призначається вузлам із потужними процесорами або меншими навантаженнями. 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 у літературі, включаючи RBS [20], протокол Ромера [10], протокол PalChaudhuri та ін. [21], широко використовуювану техніку асинхронної дифузії W. Su, I (Akyulvani) і Li Rus [22] , мають скроневі структури. Чому це так. Як це працює Кожен вузол у мережі має можливість безпосередньо спілкуватися зі своїми одноранговими вузлами. Збій головного вузла уникається, що означає, що додаткова синхронізація неможлива. Хоча тимчасові вузли пропонують більшу гнучкість, ними не так легко керувати.

Корекція годинників в порівнянні з некерованими годинниками:

Синхронізація часу. Синхронізація зазвичай досягається в більшості методів шляхом налаштування локальних годинників на кожному вузлі відповідно до глобальної шкали часу або відомого міжнародного атомного годинника для зручного відліку часу. Це протокол, використаний Mock et al. [18], а також протоколом Ping [19]. Локальні годинники мережі синхронізуються миттєво або безперервно, без жодних змін.

Нестримні годинники. Використання загальноприйнятої концепції часу без синхронізації стає все більш поширеним через значну економію енергії, пов'язану з цією технікою. Замість того, щоб постійно оновлювати свій годинник, кожен вузол підтримує власний годинник і таблицю перекладу часу, яка пов'язує його з годинниками інших вузлів. Потім вузол перетворює пакети даних з інших джерел у свій внутрішній годинник за допомогою таблиць перетворення. Таблиці перетворення часу також використовуються пізнішими вузлами для перетворення їх інформації в місцевий час без додаткової обробки. Для вимірювання сумісності локальних позначок часу використовується таблиця.

Отже, годинники можуть вільно працювати без посилань завдяки наявності універсального часового поясу. Під час обміну між вузлами мітки часу перетворюються на значення локального годинника вузла-одержувача. До них відносяться затримки в переміщенні від одного вузла до іншого та час, потрібний для простою повідомлення. Цей принцип використовується RBS і Romer.

Внутрішня синхронізація в порівнянні з зовнішньою синхронізацією:

Внутрішня синхронізація. Годинники всіх вузлів синхронізуються внутрішньо, без необхідності підтримки зовнішнього системного годинника. Це називається внутрішньою синхронною ентропією. Внутрішня синхронізація призначена для забезпечення рівномірного перегляду часу на кожному вузлі мережі, незалежно від будь-яких відхилень від зовнішніх опорних точок часу. Синхронізація із зовнішнім джерелом забезпечується зовнішньою синхронізацією, яка також гарантує рівномірність між усіма годинниками в мережі. Під час синхронізації мережевих вузлів із зовнішнім системним годинником максимальне зміщення системного годинника використовується для визначення його точності. Коли вузли в мережі внутрішньо синхронізовані, максимальний зсув між будь-якими двома тактовими сигналами вказується точністю (Kopetz 1997).

Слід зауважити, що якщо два вузли синхронізовані ззовні з точністю до 2, то вони також є внутрішньо синхронними з такою ж точністю 2. Замість того, щоб забезпечити внутрішню синхронізацію, годинники є узгодженими з точки зору причинності. Відповідно до причинності ці годинники є логічними.

Зовнішня координація. Зовнішня синхронізація передбачає підключення годинників усіх вузлів до зовнішнього джерела часу або системи. Для синхронізації зовнішнього системного годинника використовується точний стандарт реального часу, наприклад UTC. Синхронізація локальних годинників датчиків передбачає модифікацію їх контрольного часу. Це спосіб синхронізації протоколів, таких як NTP, оскільки зовнішня синхронізація більше підходить для слабо зв'язаних мереж, таких як Інтернет. Зовнішня синхронізація зазвичай не виконується в більшості мережевих протоколів датчиків через міркування енергоефективності, а використання зовнішніх джерел синхронізації зазвичай потребує значного споживання енергії.

Як правило, внутрішня синхронізація забезпечує більш точну роботу системи, але зовнішні синхронні операції в основному призначені для надання користувачам зручної інформації про час. Важливо відзначити, що внутрішня синхронізація може відбуватися в режимах «рівноправний» або «головний підлеглий». Зовнішня синхронізація не може бути досягнута за допомогою однорангового зв'язку, але для цього необхідний зв'язок головного вузла зі спеціалізованими службами часу, такими як GPS, щоб узгодити підлегли та себе із встановленим опорним часом.

Імовірнісна і детермінована синхронізація:

Імовірнісна синхронізація. Цей підхід пропонує неявну гарантію максимально можливого обертання годинника з безвідмовним значенням, яке можна встановити. Це випадок імовірнісного підходу, оскільки загалом детермінований (або заснований на правилах) підхід до синхронізації

вимагає, щоб протокол здійснював більше передач повідомлень і виконував більше обробки. У бездротовому середовищі з обмеженою енергією це може бути неймовірно дорогим. Варіація ймовірності RBS за допомогою PalChaudhuri et al. протокол. Arvind [8] представив імовірнісний підхід до дротових мереж.

Детермінована синхронізація. Детермінований алгоритм Arvind є одним із небагатьох, який може забезпечити позитивну верхню межу зміщення тактової частоти. У літературі описані алгоритми, які базуються на детермінованих принципах. У протоколі Sichitiu і Veerarittiphan [24] наголошується на використанні змінного в часі алгоритму. Протокол дифузії часу [22] і RBS також є детермінованими.

Передавач-приймач синхронізація проти приймач-приймач синхронізації:

Більшість існуючих методів передбачає підключення передавача та приймача, представлення поточних значень годинника як часових позначок. Це робиться за допомогою цього методу. Відповідно, відхилення в затримці повідомлення роблять ці методи сприйнятливими. Синхронізація між одержувачами може бути досягнута за допомогою нових методів, таких як RBS, які покладаються на час доставки повідомлення для кожного одержувача. Метод знижує критичний за часом шлях, який відповідає за недетерміновані помилки в протоколі, і включає цикл повідомлень.

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 цієї стратегії очевидні. Час зв'язку між передавачем і приймачем пропорційний. Відмінності виникають через затримки в мережі (специфічні для мереж з кількома переходами) і робоче навантаження на задіяні вузли. Більшість методів після кількох випробувань обчислюють середню затримку повідомлення, але вони є неточними та викликають додаткові витрати. Крім того, необхідно враховувати час, який передавач витрачає на підготовку та передачу повідомлення, а також час одержувача на обробку тієї самої інформації.

Синхронізація приймача з приймачем. Цей метод використовує перевагу фізичної характеристики середовища мовлення, що два приймачі можуть отримувати одне й те саме повідомлення синхронно під час дифракції. У цьому випадку замість того, щоб спілкуватися безпосередньо з відправником, одержувачі просто обмінюються часом, коли вони отримали те саме повідомлення, і знаходять своє зміщення на основі різниці в часі отримання. Помітна перевага полягає в мінімізації різниці в тривалості повідомлення. Уразливість цього протоколу обмежена варіаціями часу прийому та затримки розповсюдження для різних приймачів.

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.

3.6.2 Методи синхронізації відповідно до особливостей мереж

- Однострибкові і багатострибкові мережі

Однострибковий зв'язок. Мережа з одним переходом дозволяє будь-якому сенсорному вузлу в мережі безпосередньо обмінюватися повідомленнями. Незважаючи на це, програми бездротової сенсорної мережі можна використовувати в кількох доменах або областях. Зв'язок може здійснюватися між вузлами в сусідстві за допомогою обміну повідомленнями за один стрибок.

Неможливо для кожного сенсорного вузла взаємодіяти з кожним іншим вузлом ізольовано через великі мережі. У той час як у Mock et al., Ganeriwal et al., Ping і PalChaudhuri et al є протоколами зв'язку з одним стрибком, їх можна розширити, щоб включати кілька ходів [28].

Мультистрибковий зв'язок. Розширення бездротових сенсорних мереж потребує використання багатопрхідного зв'язку. За цих налаштувань датчики в одному домені можуть взаємодіяти з датчиками в іншому домені за допомогою проміжних датчиків, пов'язаних один з одним. Процес зв'язку може бути досягнутий через послідовність переходів, які включають сусідні датчики в парах. Передача кількох стрибків може бути досягнута за допомогою RBS, протоколу Ping, PalChaudhuri та ін. протокол і протокол дифузії часу.

- Стаціонарні і мобільні мережі

Хоча мобільність має важливе значення для бездротового середовища, досягнення ефективної синхронізації все ще є складнішим завданням. Отже, топологія мережі піддається частим змінам і вимагає більш узгоджених протоколів.

Стаціонарні мережі. У стаціонарних мережах датчики залишаються нерухомими. Наприклад, це може включати систему датчиків, які керують рухом автомобіля в одиночній камері. Після того, як датчики розгорнуті в

середовищі, топологія цих сенсорних мереж залишається постійною. RBS, Mock et al., Ganeriwal et al., і PalChaudhuri et al. використовувати протоколи, орієнтовані на наземні лінії.

Мобільні мережі. Мобільні мережі дозволяють датчикам переміщатися та підключатися лише тоді, коли вони знаходяться в межах географічного діапазону з'єднань інших датчиків. У радіусі дії мобільного датчика він може спілкуватися та обмінюватися повідомленнями з іншими датчиками. Надійний протокол, який може впоратися з частими змінами топології мережі, спричиненими переміщенням вузлів, – це те, показує Romer. Перерахунок околиць або кластерів і повторна синхронізація вузлів зазвичай потрібні для подолання проблеми змін топології.

- Підхід на основі MAC-рівня і стандартний підхід

Частиною каналу даних OSI є рівень керування доступом до середовища передачі (MAC). Функції на цьому рівні:

- Забезпечення надійності суміжних рівнів щодо підключень фізичного рівня.
- Запобігання будь-яким колізіям передачі, щоб переконатися, що вузли відправника та призначеного одержувача не заважають попереднім передачам.

Протоколи MAC не використовуються в широкомовному посиленні [20], щоб уникнути тісної інтеграції додатків із основною/зайнятою 256-розрядною архітектурою операційної системи. Протоколи рівня MAC, такі як запропоновані Mock et al., Ganeriwal et al., Sichitiu і Veerarittiphan, використовують протокол CSMA/CA.

Висновки до розділу 3

В даному розділі було викладено концепцію годинника в бездротових сенсорних мережах, її функції та призначення, а також сформульовано. Визначено будь-які потенційні помилки в показаннях годинника, їх причини та способи їх усунення. Була досліджена можлива категорія поділу для протоколів синхронізації, яка включала головний підлеглий/одноранговий, кілька стрибків/один стрибок, зовнішній/внутрішній та можливість мобільності.

РОЗДІЛ 4 МЕТОД ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКИХ ТА ПОВІЛЬНИХ ЛОКАЛЬНИХ ГОДИННИКІВ

4.1 Постановка задачі

Найпоширенішими є бездротові сенсорні мережі, що забезпечують живлення окремих сенсорних вузлів. Очікуваний термін служби сенсорного вузла становить кілька років. Імпульсна робота мережі дозволяє продовжити роботу, оскільки більшість вузлів знаходяться в сплячому режимі і утримуються від виконання будь-яких операцій. Вузли активуються на регулярній основі, збираючи дані про оточення (наприклад, вологість або температуру) і обмінюючись інформацією з найближчими вузлами.

Сеанс зв'язку можна запланувати, лише якщо всі задіяні датчики ввімкнуть свої трансивери одночасно. Необхідна координація локальних годинників між сенсорними вузлами. Крім того, час, необхідний для створення позначок часу для даних, зчитованих із датчиків, має відбуватися саме на вузлі датчика. Давайте дослідимо потенційні плани 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.

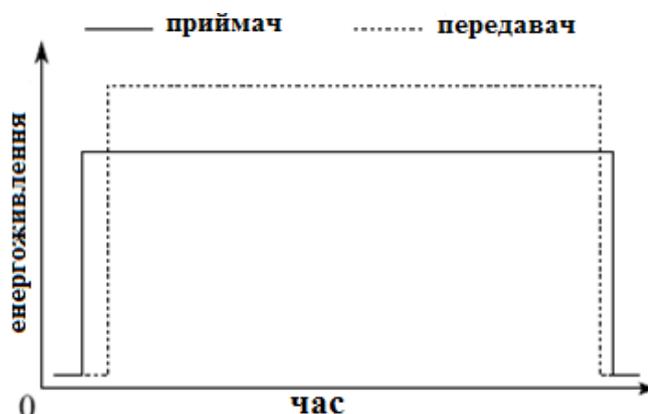


Рисунок 4.1. – Успішний сеанс зв'язку: приймаючий вузол починає прослуховувати ефір лише трішки раніше, ніж передаючий вузол починає

відправку пакету

2) Розглянемо сеанс зв'язку, де поступова десинхронізація локальних годинників датчиків призводить до того, що приймач отримує вхідні дані, щоб прослухати їх задовго до того, як вузол-передавач почне надсилати випущені пакети. Такий сеанс зв'язку зображено на рисунку 4.2. Цей сеанс буде неефективним, оскільки сенсорний вузол витрачає більше часу на прослуховування, ніж на отримання переданого пакета.

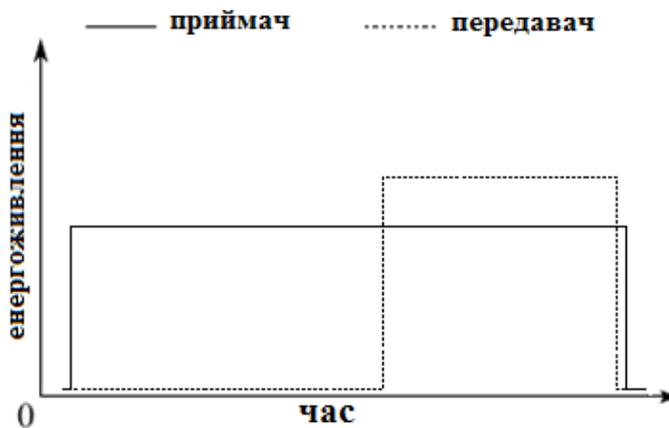


Рисунок 4.2. – Неэффективний сеанс зв'язку: приймаючий вузол витрачає забагато часу на очікування пакету (прослуховування ефіру)

3) Сеанс зв'язку, який не спрацював на рисунку 4.3, був припинений приймальним датчиком до того, як вузол-передавач міг почати надіслання пакету. Через збій синхронізації вузлів пакети не передавались.

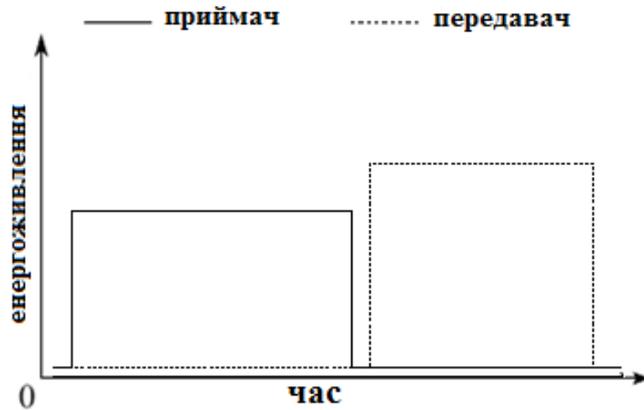


Рисунок 4.3. – Невдалий сеанс зв'язку: приймаючий вузол закінчив сеанс прослуховування ефіру раніше, ніж передаючий вузол почав відправку пакетів

Сенсорний вузол в основному використовує енергію від приймача. Його робота може заощадити багато часу енергії, але його короткочасність незначна. Завдяки оптимізації синхронізації тактових сигналів між передавальним і приймальним вузлами зменшується обсяг простору, який приймаюча сторона може дозволити під час інтервалу прослуховування, а збільшення споживання енергії під час прослуховування порожнього аудіопотоку заощадить енергію. Погана синхронізація призводить до неефективного використання електроенергії на приймальному вузлі.

Наведений вище аналіз показує, що необхідний найточніший метод синхронізації, щоб гарантувати, що сенсорні вузли споживають якомога менше енергії та працюють із максимальною ефективністю.

У багатьох дослідженнях, використовуються швидкі безперервні годинники з одним спільним недоліком. Висока точність синхронізації часу досяжна, але енергоефективність страждає через високе енергоспоживання постійно працюючого генератора. Деякі розподілені системи використовують GPS або ГЛОНАСС для синхронізації часу, наприклад SDN. Точність вимірювання часу становить близько 240 мілісекунд [40] для систем GPS.

Незважаючи на додавання модуля GPS, вартість його встановлення буде значно вищою, а енергоспоживання вузла мережі датчиків буде більшим, ніж потрібно для досягнення високоточної синхронізації годинника. Крім того, неможливо стежити за GPS всередині будівель. Отже, наведені вище методи забезпечують або високу точність, або низьке енергоспоживання. Щоб досягти задовільного рівня точності, необхідно враховувати споживання електроенергії.

4.2 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.

За допомогою запропонованого підходу можна досягти попарної синхронізації вузлів BSM. Сенсорна мережа зберігає поточну інформацію про різницю між своїм годинником і годинниками лише вузлів, з якими вона спілкується або розташованих поблизу. Кілька моделей синхронізації часу забезпечують рівномірний розподіл часу в мережі, але це збільшує складність і вимагає більше енергії, не пропонуючи значних переваг. Проте все ще є випадки, коли це відбувається.

4.3 Врахування температурних поправок

Частота роботи кварцових резонаторів змінюється залежно від температури, причому до її впливу чутливий як швидкий, так і повільний кварцові резонатори. На рисунку 4.4 і рисунку 4.5 показані залежності величини зміни частот повільного і швидкого кварцових резонаторів щодо температури.. Для повільного резонатора побудови графіка використовуються дані виробника; для швидкого по артикулу (так як виробники не вказують свої дані).

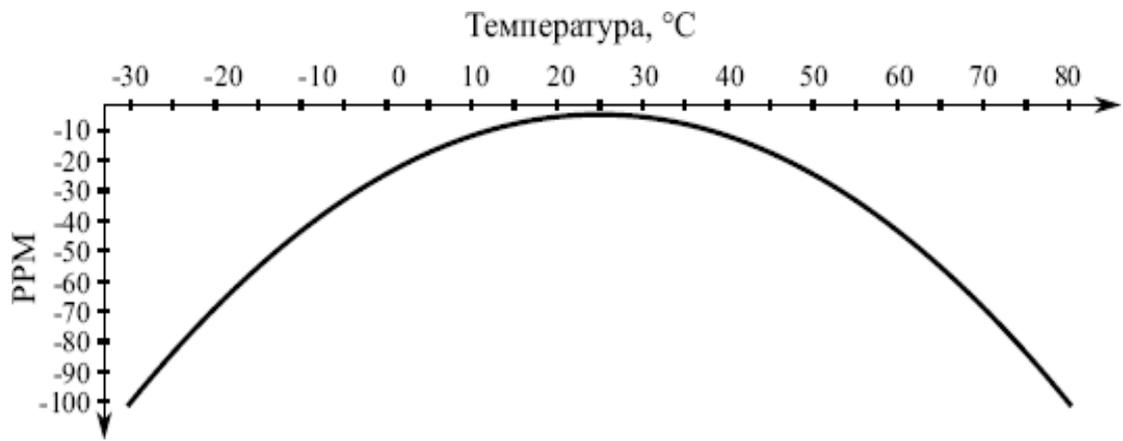


Рисунок 4.4. – Залежність частоти повільного кварцового резонатора від температури. При відхиленні температури від номінальної (25°C) частота зменшується

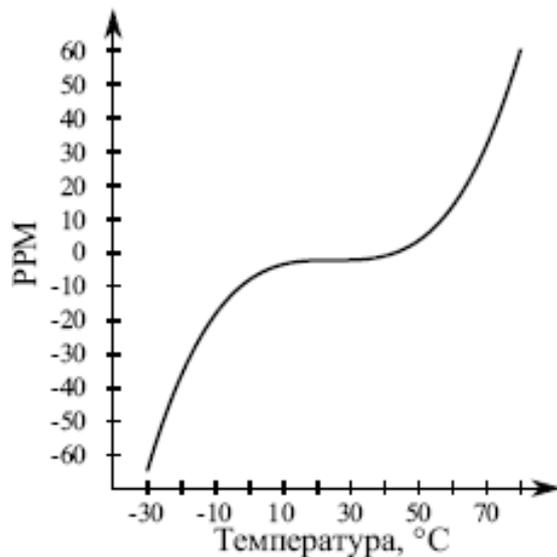


Рисунок 4.5. – Залежність частоти швидкого кварцового резонатора від температури

З огляду на той факт, що швидкі годинники здатні вимірювати лише короткі проміжки часу, означає, що температуру можна не помічати. Більшість вузлів BSM працюють повільно. 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:

$$d = \frac{32768}{1000000} \times p \quad (4.1)$$

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 (4.2):

$$t_2 = \frac{t_1 \times 32768}{32768 - d} \times p \quad (4.2)$$

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

Поправку необхідно додати до індикаторів повільних годинників, перш ніж їх можна буде використовувати. Незважаючи на те, що температура змінюється поступово, запропонований метод не враховує це і натомість вважає температури протягом інтервалу корекції еквівалентними температурам у кінці періоду калібрування. Цей факт не вплине на результат, якщо процедура проводиться регулярно, чого достатньо. Іншим варіантом є генератори з температурною компенсацією [39], які потребують більше енергії та є дорогими. За результатами калібрування окремих екземплярів кварцового резонатора в термокамері можна скласти поправочні таблиці.

4.4 Процедура калібрування повільних годинників по швидких

Калібрування передбачає порівняння повільних і швидких локальних годинників з однаковим довгим інтервалом, а потім пошук зміщення, щоб компенсувати різницю. Концепція описується цим принципом. У пристроях BSM це єдиний випадок у робочому циклі, коли швидкий годинник використовується для вимірювання нераціонально довгих інтервалів часу, що робить доцільним для них впровадження температурних поправок, як описано в параграфі 4.3.

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 (4.3):

$$C_c = 1 + \frac{\Delta_f - \Delta_s}{\Delta_s} \quad (4.3)$$

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.

Процес використовується замість тривалих періодів сну вузла BSM, які

перевищують 900 мс. Монополія процесора в довгостроковій перспективі не помітна і не перешкоджає сенсорним процесам. Отриманий калібрувальний коефіцієнт використовується кожного разу при віднесенні до показань повільних годинників. За допомогою процесу калібрування можна зменшити вплив відхилення робочої частоти від номінального значення кварцового резонатора. Процес калібрування виконується один раз на початку вузла BSM і може періодично перевірятися повторно, щоб врахувати будь-яке потенційне накопичення помилок.

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.

4.5 Алгоритм підтримки синхронізації локальних годинників сенсорних вузлів БСМ

Локальні годинники на одному датчику в згаданих вище механізмах мають мінімальну розбіжність, але з плином часу значення годинника збільшуватимуться разом із годинником кожного пристрою. В першу чергу це пов'язано зі зміною температури пристрою. Часова нестабільність кварцових резонаторів, яка змінює робочу частоту з часом, не може бути розглянута методом калібрування, оскільки швидкі та повільні мають часову нестабільність, яка дорівнює приблизно $3\text{ppm} / \text{рік}$ згідно з паспортними даними. Необхідний метод для коригування відмінностей годинника під час роботи датчика в реальних сценаріях.

Коли новий вузол датчика підключається до існуючого, годинник локального датчика спочатку синхронізується під час процесу налаштування. Після цього підтримка синхронізації стає серйозною проблемою для мережі. Алгоритм, який був створений і запропонований для цієї мети:

(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.4.6).

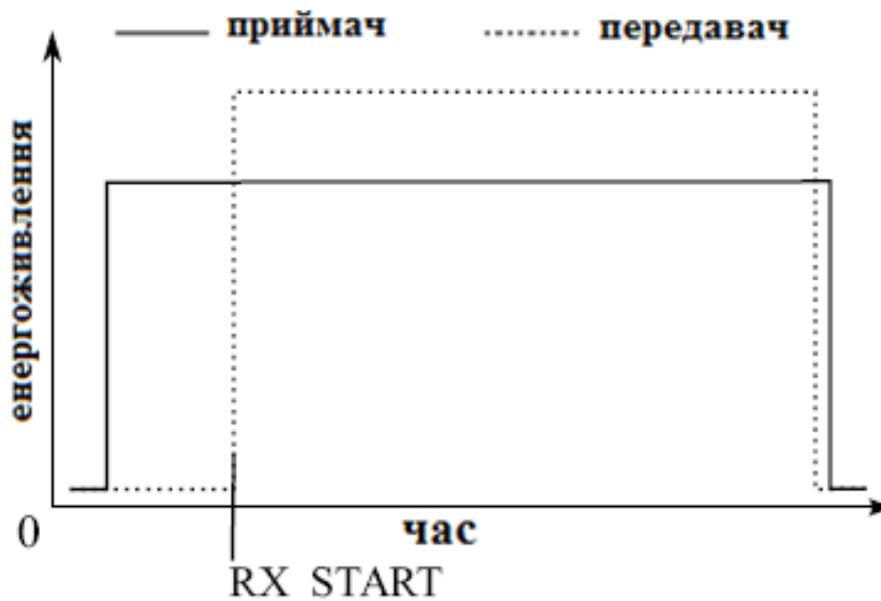


Рисунок 4.6. – Час початку отримання пакета зберігається обробником переривання

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 (4.4):

$$C'_s = C_s + D \quad (4.4)$$

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 (4.5):

$$S = \frac{D}{T_{sync}} \quad (4.5)$$

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

$$C_d = T_{next} \times S \quad (4.6)$$

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

Варто також відзначити, що пропонований 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:

$$t = t' \times C_c + C_t \quad (4.7)$$

де t' - початкові показання повільного годинника;

t – показники повільного годинника з урахуванням поправок.

Нехай наступний сеанс зв'язку по протоколу відбутися через час T

Тоді по локальному годиннику сенсора сеанс слід провести через час:

$$T' = T + C_s + C_d - \frac{C_u}{2} \quad (4.8)$$

Враховуючи, що C_u також слід збільшити час прослуховування для одного сеансу зв'язку. Беручи до уваги базову тривалість інтервалу

прослуховування T_w , це дає вдвічі кращу точність синхронізації. Ця швидкість розбіжності визначає корекцію Cd і може змінюватися відносно швидко, коли пристрої функціонують (наприклад, коли змінюється температура одного пристрою).) Якщо швидкість розбіжності було розраховано на основі даних, отриманих більше N секунд тому, і адміністратор мережі вказав N як параметр, то корекція Cd не застосовується.

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 Cd .

Висновки до розділу 4

Написано магістерську роботу про метод прецизійної синхронізації в бездротових сенсорних мережах з використанням швидкого та повільного локального годинника, тобто значного підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж можна досягти за допомогою високоточної синхронізації часу вузлів BSM за допомогою цього підходу.

Виконання моделювання повинно служити доказом представлених теоретичних висновків. Використовуючи програмний пакет Matlab + Simulink, ми можемо змоделювати мережу датчиків і проаналізувати середньоквадратичне значення кількості помилок, викликаних RBS, TPSN і методами високої точності. Діаграма 4.7 демонструє результати моделювання бездротової сенсорної мережі.

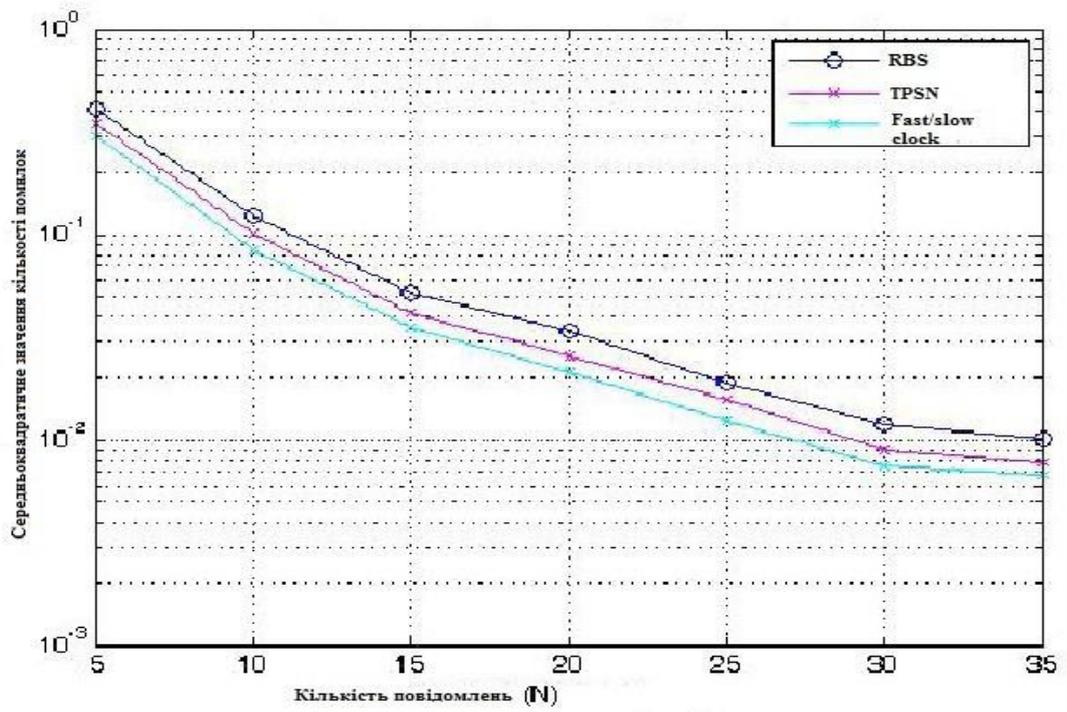


Рисунок 4.7 – Залежність кількості помилок від кількості переданих повідомлень для різних методів синхронізації

ВИСНОВКИ

В останні роки бездротові сенсорні мережі привернули увагу через їх широке використання в різних аспектах життя людини. Однак значною проблемою при проектуванні та створенні цих мереж є синхронізація годинників між сенсорними вузлами. Щоб забезпечити повну картину об'єкта, події або середовища, що контролюється, датчики повинні використовувати стандартизовані осі часу, щоб повідомляти цілеспрямовані та точні дані. Потреба в динамічній адаптації, управлінні мобільністю датчиків і масштабованості роблять неможливим використання традиційних протоколів синхронізації годинника для дротових мереж. Через обмежену ємність батареї датчики сильно обмежені в ресурсах, що ускладнює їх зарядку та заміну через їх застосування у важкодоступних місцях. Крім того, вони повинні працювати в умовах значних втрат і ненадійності. Акцент робиться на синхронізації, обмеженнях BSM та фундаментальних методах її забезпечення.

BSM описує протоколи синхронізації часу та призначає їх різним типам характеристик. Наведено порівняльний аналіз існуючих протоколів синхронізації годинника, а також їх переваги та недоліки.

У цій магістерській роботі розглядається справжня наукова проблема, пов'язана з розробкою точного методу синхронізації бездротових сенсорних мереж із використанням швидких і 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. Розбіжність, що залишилася, можна вирішити за допомогою алгоритму підтримки синхронізації в BSM. Використання такого підходу призвело до підвищення енергоефективності роботи BSM, що покращує термін служби окремих сенсорних вузлів і мережі в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Ali Al-Shaikhi; Ahmad Masoud. Efficient, Single Hop Time Synchronization Protocol for Randomly Connected WSNs *IEEE Wireless Communications Letters* , 2017, Pages: 170 – 173.
28. 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
29. Варгаузин В. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / В. Варгаузин //

ТелеМультиМедиа.

— 2005. — № 6.

30. 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.

31. 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.

32. Коваленко І.Г. Энергозберігаючі 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.

33. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и беспроводных сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // Электросвязь. — 2006.

№ 6.

34. Миночкин А.И., Романюк В.А. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей //Зв'язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.

35. 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.

36. http://cfm.citizen.co.jp/english/product/cvo_character.html.

37. http://cfm.citizen.co.jp/english/product/cvo_character.html.

38. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS4000.pdf>.

39. GPS Standard Positioning Service Performance Standard,

<http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spsp2008>

40. 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.

41. 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

УДК 621.396

А.М. Сільвестров, к.т.н., доцент,

В.С.Олефіренко, студент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

РОЗВИТОК МЕТОДІВ СИХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Сучасні досягнення у галузі безпроводового зв'язку та постійний прогрес у виробництві мікросхем відкривають нові можливості для розробки та впровадження інноваційних розподілених комунікаційних систем, зокрема, безпроводових сенсорних мереж. Ці мережі відрізняються високою масштабованістю та гнучкістю, що робить їх ідеальними для моніторингу та спостереження за різними аспектами фізичного світу у різних галузях. Інтерес до дослідження та застосування сенсорних мереж великий завдяки їхнім можливостям.

Сенсорні мережі стають важливими складовими різних галузей, де використання традиційних безпроводних мереж стає неефективним, ускладненим або навіть неможливим. Це обумовлено різноманітністю доступних датчиків та виконавчих механізмів, простотою в розгортанні та експлуатації, надійністю, компактністю та порівняно низькою вартістю. Саме ці якості сприяють поширенню та зростанню застосувань сенсорних мереж, включаючи їх впровадження в більш глобальні системи, такі як Інтернет речей.

Предметом дослідження є розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах [1].

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 обумовлена стрімким розвитком безпроводового зв'язку в світі в цілому та безпроводових сенсорних мереж, зокрема як складової 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 [2].

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

Практичні задачі, на вирішення яких спрямовано роботу:

- 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 безпроводових сенсорних мережах.

Значимість роботи для розв'язання економічних і соціальних проблем полягає в підвищенні 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 включають в себе вирішення таких питань:

- Адаптація сучасних телекомунікаційних технологій до вимог безпроводових сенсорних мереж, які є складовою концепції Інтернету речей, що набуває широкої популярності та бурхливо розвивається.

- Удосконалення моделі безпроводових сенсорних мереж 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.

Було проаналізовано та доповнено методи прецизійної синхронізації у безпроводових сенсорних мережах з використанням швидких та повільних локальних годинників. Запропоновано алгоритм підтримки синхронізації та алгоритм розрахунку часу наступного сеансу зв'язку в безпроводових сенсорних мережах.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що розроблені положення та концепції є методологічною основою для підвищення енергозбереження та ефективності функціонування безпроводових сенсорних мереж. Це дозволить підвищити достовірність передачі інформації в мережевих потоках та скоротити час доставки повідомлення, а також підвищити рівень енергозбереження безпроводових сенсорних мереж. Отримані результати можуть бути використані організаціями-замовниками, які займаються моніторингом стану докільця та інших фізичних систем, системами сигналізації і т. д., а також науково-дослідними організаціями для проведення нагляду та спостереження над різними проектами та розробками.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. Mills, Internet time synchronization: the network time protocol, IEEE Transactions on Communications, 39 (1991), P.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.

DEVELOPMENT OF SYNCHRONIZATION METHODS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

A.M. Silvestrov, Ph.D., associate professor,

V.S. Olefirenko, Student

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

ДОДАТОК Б

2 FEATURES OF SYNCHRONIZATION METHODS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

2.1. The problem of synchronization

Managing the significant differences in logic clocks between computers in distributed systems is one of the most challenging problems in computer engineering. There are two fundamental aspects to the design of most computer clocks: a frequency source and an accumulator mechanism to capture the clock signal, along with programmable counters. Different operating systems and hardware platforms have different ways of implementing computer clocks.

Synchronization errors are mainly caused by an uncompensated quartz oscillator and the clock pulses that are produced. Theoretically, clock synchronization can occur when the offsets of the two clocks are equal and the frequency sources are running at the same speed. However, in practice, clocks are calibrated with minimal accuracy and frequency sources operate at slightly different rates. In addition, factors such as initial manufacturing tolerances, aging, temperature, pressure, and others can affect the frequency of a quartz oscillator. Synchronization of distributed clocks is necessary to overcome the instability.

2.2. The importance of synchronization

A common understanding of time in a distributed system is achieved through a process known as time coordination. BSM has several main tasks to perform, such as:

- Data fusion, temporal ordering of messages[2]. Synchronization of messages requires the sharing of common time between some or all network nodes. At the time of the event, the sensor readings must be processed by most data fusion algorithms. Significant differences in message delays in sensor networks mean that distributed sensor nodes may not receive messages in the order in which they were received by the recipient.

- Power management. BSM design must consider energy efficiency, as sensors are often left unattended and unmaintained after deployment, making it difficult to replace batteries during their lifetime. Time synchronization is an important aspect of most energy-saving operations. Regular cycles that control sleep and wake modes allow nodes to consume minimal power in sleep mode, resulting in significant energy savings.
- Transmission scheduling. Several scheduling protocols require temporal coordination. A synchronized network is the only place where time division multiple access (TDMA) can be used, making it one of the most popular communication schemes for distributed networks.
- Miscellaneous. Many localization, security, and tracking protocols also require nodes to mark their messages and events.

Sensor networks can monitor a single physical phenomenon with many nodes. Consolidation of observations into a single whole is one of the key functions of synchronization with the corresponding sensor networks. Data fusion is largely time-dependent. When sensors are only able to detect objects in close proximity, they can provide information about additional factors such as object speed and size by interpolating data from multiple nodes.

The approximation of the speed of a moving object can be determined by the factor of spatial distances and time between two consecutive observations of the object by different sensor nodes. Because many physical phenomena can occur in a short time, one of the functions of dividing sensors into groups (where each group represents only one physical phenomenon) in basic systems is to share them together as part of an integrated sensor network. Temporal connections between sensor nodes are important for partitioning.

Temporal coordination between sensor nodes may also be necessary to ensure the correctness and consistency of distributed measurements [3].

The problem of time synchronization is a significant research challenge in the design of energy-efficient BSMs.

2.3. Requirements for synchronization in the BSM

Existing methods for timing in WSNs are insufficient for a number of reasons. High energy efficiency is a requirement for sensor networks due to the assumption that nodes in a BSM are unmanageable and have limited battery availability. Current approaches to time synchronization do not take this limitation into account. The use of bandwidth consumption in NTP protocols is conservative and inefficient for devices that consume a lot of power even while passively listening to radio waves.

When determining the requirements for wireless sensor networks, it is important to consider some indicators:

- accuracy, which is defined as the difference in a group of BSM nodes or the maximum error value relative to external standards;
- duration of sensor node operation, which can vary from stable synchronization over a long period of time when the network is active to almost instantaneous (beneficial, for example, when nodes need to compare the time of detection of a certain event);
- scalability and availability - a set of nodes that are synchronized and fully cover a certain region;
- efficiency, which is achieved by saving time and energy.
- cost and form factor - can be crucial in networks that include thousands of small, autonomous sensor nodes.

The currently proposed time synchronization methods are compromise solutions that may not be optimal in every scenario. It is possible to synchronize users' GPS receivers with the 200 ns precision time standard [5]. However, GPS devices often cannot be used (e.g., underwater), and synchronization can take several minutes. In certain situations, GPS devices will be too large and expensive compared to sensor nodes.

It is advisable to consider a small group of nodes with low-power radios. If one node transmits a signal, the others can use this signal as a reference to compare the time at which they received this signal. This form of synchronization is only available at the

application layer, and its accuracy is limited by two factors: the variable delay in the radios and the propagation delay of the radio wave. This synchronization time will be finite, as the node clock will deviate from the original pulse. However, the pulse requires only a single signal to be transmitted, so it is fast and quite energy efficient.

Significant energy savings can be achieved by removing duplicate notifications of the same event from a group of neighboring sensor nodes. The timestamp must be as accurate as the frequency of events, which can range from tens to hundreds of milliseconds. The data collection has to be complex and time-consuming, even for intermediate nodes, as they may travel a considerable distance across the network.

As with wired environments, time synchronization in WSNs is prone to problems such as clock glitches and different clock offsets due to changes in temperature and humidity. However, time synchronization protocols for sensor networks must take into account a number of additional issues and challenges, which will be discussed in the next section. Several unique characteristics of WSNs often preclude the use of existing synchronization methods in this area.

2.3.1. Consideration of the impact of external conditions

Temperature, pressure, and humidity can affect the speed of the watch. Unlike wired computers, wireless sensors are usually located in harsh environments where fluctuations in environmental characteristics prevail.

In a control environment, the oscillator frequency can vary up to 3 md (a deviation of 1 mm is an error of about 1 second every 12 days) as a result of temperature fluctuations that have been recorded (Mills 1998). External sensor nodes, which are inexpensive, can show stronger variations.

2.3.2. Energy constraints

Wireless sensor nodes are typically powered by limited energy, which can be disposable or rechargeable batteries (e.g., solar panels). If the batteries are replaced, the cost of the BSM can be prohibitive, especially if the devices are located in areas that

require maintenance. Time synchronization protocols should not significantly impact the power consumption of wireless nodes to ensure long battery life. Energy-efficient time synchronization protocols should target a minimum number of messages to achieve synchronous node behavior, as communication between sensor nodes is usually the basis for time synchronization.

2.3.3. Wireless environment and mobility

It is known that the wireless environment is highly variable and can be affected by changes in environmental characteristics due to factors such as rain, fog, wind, and temperature (Otero et al. 2001). Due to these variations, wireless sensor nodes are subject to greater network bandwidth limitations, error rates, and radio interference. Node A can receive messages from node B while the messages sent to nodes A are too weak to be interpreted correctly.

This complicates the communication channel from the central application sensor to the other nodes, resulting in asymmetric communication delays. Channel characteristics also differ significantly from one application to another. Communication interference in wireless networks is determined by the network density, communication range, and frequency of available wireless devices, as well as the activity level of these devices.

Many wireless sensors are portable, such as those installed in cars or carried by people, which can cause significant and immediate changes in topology and communication quality. Finally, sensor nodes can fail or deplete their energy, requiring time synchronization to function properly, regardless of network behavior or density. Because of these challenges, time synchronization protocols must be robust and flexible.

2.3.4. Other restrictions

Time synchronization protocols need to be lightweight and also have energy constraints that arise from the low cost and low power of sensor nodes, which are limited in terms of both processor speed and memory. Due to the small size and cost of sensor devices, it is not possible to achieve synchronization using expensive and bulky hardware such as GPS receivers. The development of time synchronization protocols must be resource intensive to ensure that the cost of the sensor device is kept to a minimum. With the proliferation of wireless sensor networks, synchronization protocols need to scale well according to the number of nodes or the growth of network density. Ultimately, different sensor applications will require different degrees of clock accuracy. An object tracking program can be created with a streamlined and straightforward message without the need for an external reference clock. However, the required accuracy should be in the range of a few microseconds. On the other hand, sensor networks that track pedestrian flow in public places at certain times of the day will require external synchronization, where accuracy in the range of seconds may be sufficient

Conclusions to Section 2

The second section discussed the challenges of time management in wireless sensor networks, emphasizing its importance and explaining its effectiveness. The full utilization of BSM requires time coordination due to various factors such as power consumption (synchronous transition from sleep to active mode), data collection, and data transmission to the control center.

Додаток В

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

РОЗВИТОК МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

DEVELOPMENT OF SYNCHRONIZATION METHODS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Керівник: А.М Сільвестров ,
к.т.н., професор
Виконав: В.С. Олефіренко,
студент 601-ТТ

Об'єктом дослідження є безпроводові сенсорні мережі

Предметом дослідження є розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах..

Метою дослідження є розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах шляхом покращення енергоефективності мережі та показників синхронізації часу.

Основним практичним результатом - на основі проведеного порівняльного аналізу існуючих протоколів і підходів до синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах запропонувати рішення, яке дозволило б покращити ефективність часової синхронізації в БСМ.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Вирішення задачі адаптації сучасних телекомунікаційних технологій до вимог безпроводових сенсорних мереж
- 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

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

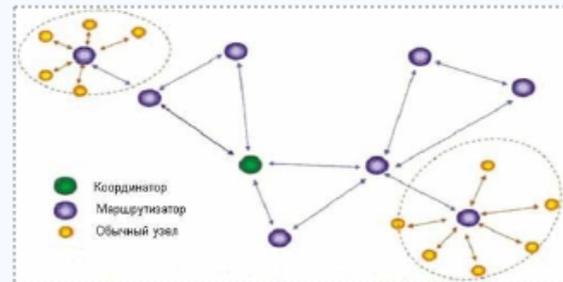
З стрімким розвитком безпроводового зв'язку в світі в цілому та БСМ, аспект синхронізації стає критично важливим, оскільки проектування багатьох протоколів і успішна реалізація програм вимагають точного часу.

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.

БСМ

Розподілена, зі здатністю до самоорганізації, мережа великої кількості датчиків, об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу.

В склад датчиків зазвичай входять автономні мікрокомп'ютери (контролери) з живленням від батарей і приймачі, що дозволяє датчикам організуватися в спеціалізовані мережі, зв'язуючись один з одним і обмінюючись даними за допомогою радіозв'язку.



Архітектура БСМ

Порівняння традиційних мереж і БСМ

Традиційні мережі	Безпроводові сенсорні мережі
Типові обмеження відносяться до пропускної здатності і затримкам; споживання енергії не розглядається	Споживання енергії – головний обмежувачий фактор при проектуванні вузлів і мережі в цілому
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

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;
- Управління живленням;
- Планування передачі.

ВИМОГИ ДО СИНХРОНІЗАЦІЇ В БСМ

- Точність;
- термін роботи сенсорного вузла;
- масштабованість та доступність;
- ефективність;
- вартість і форм-фактор.

Всі рішення, що пропонуються в існуючих методах синхронізації часу, є компромісними – жоден метод не є оптимальним в усіх випадках.

Механізми,
які дозволяють добитися мінімальної розбіжності локальних годинників

Врахування змін частоти
роботи кварцових
резонаторів залежно
від температури

Процедура калібрування
повільних годинників по
швидким

Та все ж таки 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

Це говорить про необхідність введення методу корекції розбіжностей годинників під час роботи сенсорів в реальних умовах.

Для цього було розроблено і запропоновано алгоритм

1.Приймаючий вузол під час планування чергового сеансу зв'язку оцінює час, через який має відбутися сеанс.

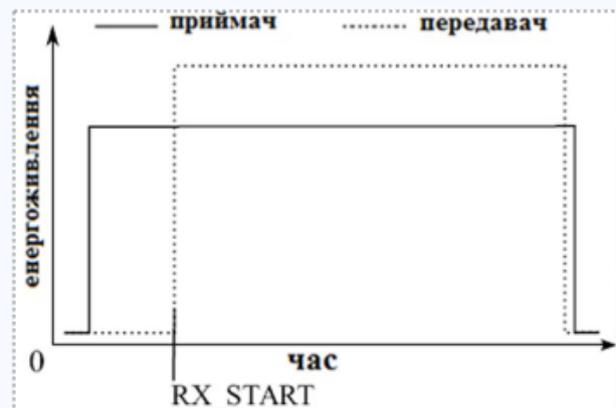
2.Настає час сеансу, передаючий вузол виконує одну з дій:

- (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.

3.Приймаючий вузол, використовуючи переривання RX_START, зберігає тимчасову мітку початку отримання пакета

Після цього обчислюється різниця D між фактичним і очікуваним часом початку отримання пакету і проводиться зсув часу наступного сеансу за формулою

$$C'_s = C_s + D$$



Час початку отримання пакета зберігається обробником переривання

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

$$S = \frac{D}{T_{sync}}$$

Варто також відзначити, що пропонуваній 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:

$$t = t' \times C_c + C_t$$

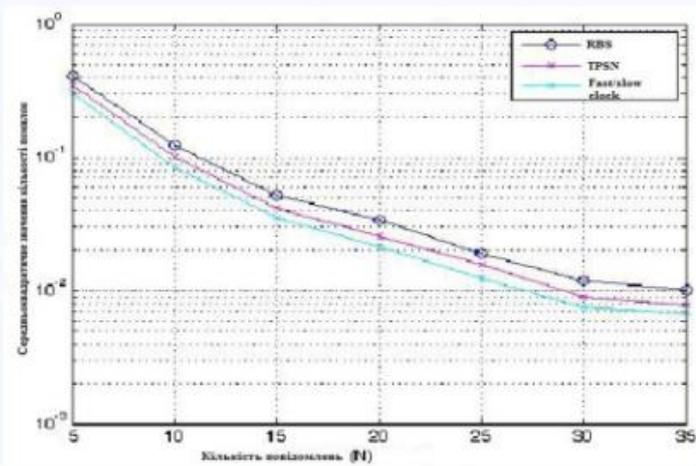
де t' - початкові показання повільного годинника;

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:

$$T' = T + C_s + C_d - \frac{C_u}{2}$$

Імітаційне моделювання в підтвердження отриманих теоретичних результатів



ВИСНОВКИ

- ✓ Розв'язана 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 енергоефективність функціонування БСМ, тим самим збільшено термін служби окремих сенсорних вузлів і мережі в цілому



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ !