

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних
сенсорних мережах»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-92

Вавринюк Дмитро Сергійович _____

Керівник:

Науковий керівник ННІТС, академік НАН України

д.т.н., професор Ільченко Михайло Юхимович _____

Консультант:

професор кафедри ТК ННІТС, д.т.н., професор

Лисенко Олександр Іванович _____

Рецензент:

професор кафедри ІКТС НН ІТС

КПІ ім. Ігоря Сікорського, д.т.н., професор

Скулиш Марія Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Вавринюку Дмитру Сергійовичу

1. Тема роботи «Вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах», керівник Ільченко Михайло Юхимович, науковий керівник НН ІТС, академік НАН України, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «22» травня 2023 р. № 1884-с.
2. Термін подання студентом роботи 16 червня 2023 року.
3. Вихідні дані до роботи.
4. Зміст роботи:
 1. Огляд особливостей мобільних сенсорних мереж
 2. Особливості синхронізації в мобільних сенсорних мережах
 3. Аналіз та вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
 1. Вступ до теми «Вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах»

2. Мета, об'єкт та предмет дослідження бакалаврської дипломної роботи
 3. Огляд мобільних сенсорних мереж
 4. Компоненти , які зазвичай спричиняють помилки синхронізації
 5. Вимоги до схем синхронізації для сенсорних мереж
 6. Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN
 7. Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP
 8. Reference Broadcast Synchronization, RBS
 9. Множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA)
 10. Множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA)
 11. Множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA)
 12. Енергоспоживання схем синхронізації
 13. Проблеми таксономії алгоритмів за синхронізацією
 14. Порівняння запропонованих методів
 15. Порівняльна інформація про концепції забезпечення синхронізації в мережах
 16. Висновки
6. Дата видачі завдання 14 жовтня 2022р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд особливостей мобільних сенсорних мереж	14.10.22-24.01.22	Виконано
2	Розвиток способів синхронізації в МСМ	25.01-10.04.23	Виконано
3	Порівняння точності синхронізації та енергоспоживання різних алгоритмів синхронізації	11.04-25.04.2023	Виконано
4	Ознайомлення з компонентами , які спричиняють помилки синхронізації	26.04-05.05.2023	Виконано
5	Оцінка ефективності способів синхронізації	06.05-17.05.2023	Виконано
6	Аналіз і оцінка енергетичної ефективності	18.05-26.05.2023	Виконано
7	Підготовка матеріалів одруку та оформлення пояснювальної записки	27.05-12.06.2023	Виконано

Студент

Дмитро ВАВРИНЮК

Керівник

Михайло ІЛЬЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 85 сторінок, 17 рисунків, 11 таблиць. Було використано 36 джерел інформації.

Мета роботи: вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах. Головним завданням є розробка та впровадження нових методів і технік, які дозволять покращити точність та надійність синхронізації мобільних сенсорних вузлів у бездротових мережах. Для досягнення цієї мети, робота буде зосереджуватися на наступних завданнях: аналіз існуючих алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах, їх переваг та обмежень. розробка нових алгоритмів та методів синхронізації, що враховують особливості мобільних сенсорних мереж, моделювання та симуляція розроблених алгоритмів для оцінки їх продуктивності та ефективності, аналіз результатів, порівняння з існуючими алгоритмами та оцінка вдосконалень, що були досягнуті.

Основним результатом дипломної роботи будуть розроблені алгоритми синхронізації, який покаже покращену продуктивність та ефективність у мобільних сенсорних мережах. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації та поліпшення роботи сучасних бездротових сенсорних мереж у різних сферах застосування, таких як інтернет речей, моніторинг довкілля, медичні системи та багато іншого.

Ключові слова: алгоритми синхронізації, мобільні сенсорні мережі, бездротові мережі, сенсорні вузли, годинник, точність синхронізації, надійність синхронізації, техніки синхронізації, моделювання та симуляція, прототипування, продуктивність алгоритмів, ефективність алгоритмів, оптимізація бездротових сенсорних мереж, моніторинг довкілля.

ABSTRACT

The work contains 85 pages, 17 figures, 11 tables, 36 sources have been used.

Purpose of the work: improving synchronization algorithms in mobile sensor networks. The main objective is to develop and implement new methods and techniques that will improve the accuracy and reliability of synchronization of mobile sensor nodes in wireless networks. To achieve this goal, the work will focus on the following tasks: analysis of existing synchronization algorithms in mobile sensor networks, their advantages and limitations. development of new synchronization algorithms and methods that take into account the features of mobile sensor networks, modeling and simulation of the developed algorithms to evaluate their performance and efficiency, analysis of results, comparison with existing algorithms and evaluation of improvements that have been made.

The main result of the thesis will be the developed synchronization algorithms, which will show improved performance and efficiency in mobile sensor networks. The results of the research can be used to optimize and improve the performance of modern wireless sensor networks in various applications such as the Internet of Things, environmental monitoring, medical systems, and much more.

Keywords: synchronization algorithms, mobile sensor networks, wireless networks, sensor nodes, clocks, synchronization accuracy, synchronization reliability, synchronization techniques, modeling and simulation, prototyping, algorithm performance, algorithm efficiency, optimization of wireless sensor networks, environmental monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	12
ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	12
1.1 СТРУКТУРА МСМ.....	12
1.2 ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ МСМ	14
1.2.1 Сенсорні вузли	16
1.2.2 Технологія мініатюризації датчиків.....	17
1.2.3 Технологія отримання енергії з навколишнього середовища	18
1.3 ТЕХНОЛОГІЯ МЕРЕЖЕВОГО ДОСТУПУ	20
1.4 ІСТОРІЯ І ПРОМИСЛОВІ СТИМУЛИ РОЗВИТКУ МСМ.....	21
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2	28
ОСОБЛИВОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ.....	28
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	28
2.1 ТОПОЛОГІЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	28
2.1.1 Самокеровані мережеві технології.....	29
2.1.2 Ефективні та доступні бездротові IP-з'єднання в сенсорних мережах	31
2.1.3 Автономна технологія керування потоками	34
2.2 ГРУПУВАННЯ ДАНИХ	35
2.3 СИНХРОНІЗАЦІЯ ВУЗЛІВ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	36
2.3.1 Фактори спричинення помилок синхронізації часу	39
2.3.2 Вимоги до синхронізаційних схем у сенсорних мережах	40
Висновки.....	42
РОЗДІЛ 3	44
АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В	
МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	44
3.1 МЕТОДИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДЛЯ У МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	44
3.1.1 Множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA)	47
3.1.2 Множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA).....	49

3.1.3 Множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA)	51
3.1.4 Синхронізація таймінгів для сенсорних мереж (Timing-SyncProtocolforSensorNetworks, TPSN).....	53
3.1.5 Еталонна ширококомовна синхронізація (RBS).....	58
3.1.6 Протокол синхронізації часу заповнення (Flooding Time Synchronization, FTSP).....	60
3.3 TINY-SYNC та MINI-SYNC.....	62
3.4 АЛГОРИТМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ДЕРЕВА	63
3.5 СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ СХЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ.....	65
3.6 ОЦІНКА АЛГОРИТМІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ	71
3.7 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	72
3.8 ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ З ТОЧКИ ЗОРУ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ.....	74
3.9 ТИПИ ТА КАТЕГОРІЇ ПРОТОКОЛІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ: СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ.....	76
Висновки.....	78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CSMA/CA	(Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) – множинний доступ з контролем несучої і униканням колізій
FTSP	(Flooding Time Synchronization Protocol) – протокол синхронізації часу заповнення
GPS	(Global Positioning System) – система глобального позиціонування
GTSP	(GradientTimeSynchronizationProtocol) – протокол градієнтної часової синхронізації
MAC	(Media Access Control) – рівень управління доступом до середовища
OSI	(Open Systems Interconnection Basic Reference Model) – базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
LTS	(Lightweighttimesynschronization) – легка деревовидна синхронізація
NTP	(NetworkTimeProtocol) – протокол мережевого часу
PBS	(Pairwise Broadcast Synchronization) – попарна ширококомвна синхронізація
RBS	(Reference Broadcast Synchronization) – еталонна ширококомвна синхронізація
FDMA	(Frequency Division Multiple Access) - множинний доступ з частотним розділенням каналів
TPSN	(Timing-Sync Protocol for Sensor Networks) - синхронізація таймінгів для сенсорних мереж
CDMA	(Code Division Multiple Access) - множинний доступ з кодовим поділом каналів
ROS	(Reciever-only synchronization) – синхронізація лише приймача
RRS	(Reciever-to-receiver synchronization) – приймач-приймач синхронізація
TDMA	(Time Division Multiple Access) –

множинний доступ з часовим розділенням каналів

UTC	(Coordinated Universal Time) – всесвітній координований час
WSN	(Wireless Sensor Network) – бездротова сенсорна мережа
MSN	(Mobile Sensor Network) – мобільна сенсорна мережа
MCM	мобільна сенсорна мережа

ВСТУП

Мобільні сенсорні мережі - це сукупність невеликих малопотужних датчиків, які можуть вільно переміщатися і збирати дані про навколишнє середовище. Ці мережі набувають все більшого значення в різних галузях, включаючи моніторинг навколишнього середовища, управління стихійними лихами та військове спостереження. Однак однією з головних проблем мобільних сенсорних мереж є синхронізація сенсорних вузлів, яка має вирішальне значення для точного збору та обробки даних.

Алгоритми синхронізації в мобільних сенсорних мережах використовуються для того, щоб вузли мали спільне розуміння часу, що є важливим для точного злиття даних, відстеження цілей і виявлення подій. Однак через динамічну природу мобільних сенсорних мереж процес синхронізації може бути складним. Вузли можуть рухатися непередбачувано, страждати від перешкод і відчувати затримки зв'язку - все це може вплинути на точність і ефективність синхронізації.

Об'єктом дослідження в даній темі є розробка покращених алгоритмів синхронізації для мобільних сенсорних мереж. Основною метою є підвищення точності та ефективності синхронізації, тим самим покращуючи загальну продуктивність мережі. Це досягається шляхом вирішення проблем, які виникають через мобільність, завади та інші фактори навколишнього середовища, що впливають на процес синхронізації.

Актуальність роботи: Точна синхронізація має важливе значення для широкого спектру застосувань, які покладаються на мобільні сенсорні мережі. Наприклад, у моніторингу навколишнього середовища точна синхронізація гарантує, що дані з різних датчиків будуть правильно співвіднесені для отримання повної картини навколишнього середовища. Аналогічно, в управлінні стихійними лихами і військовому спостереженні синхронізація дозволяє точно відстежувати мобільні цілі і виявляти потенційні загрози.

Метою досліджень з удосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах є підвищення точності та ефективності

синхронізації, тим самим покращуючи продуктивність мережі. Це важливий напрямок досліджень, що має суттєве значення для широкого спектру застосувань.

Для досягнення мети вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах дослідники запропонували кілька підходів, включаючи централізовані та розподілені алгоритми. Централізовані алгоритми передбачають використання центрального вузла, який відповідає за синхронізацію всіх інших вузлів мережі. Цей підхід, як правило, менш складний, але він може страждати від проблем з масштабуванням і надійністю.

Таким чином, дослідження щодо вдосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах є критично важливою областю досліджень, що має значні наслідки для різних застосувань. Розробляючи більш точні та ефективні алгоритми синхронізації, дослідники можуть підвищити продуктивність і надійність мобільних сенсорних мереж, що дозволить використовувати їх у більш широкому спектрі застосувань.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Структура МСМ

Мобільна сенсорна мережа (рис. 1.1) - це розподілена самокерована мережа, що складається з безлічі датчиків і виконавчих механізмів, з'єднаних радіохвилями. Ці датчики називають "мотами" через їхню схильність до зменшення. Завдяки здатності мережі передавати повідомлення від одного елемента до іншого, зона покриття може становити від кількох метрів до кількох кілометрів. Моти часто містять автономні мікрокомп'ютери (контролери), які живляться від батарейок і приймачів, що дозволяє мотам самоорганізовуватися в спеціалізовані мережі та обмінюватися інформацією по радіо. У цьому сценарії моти слугують частиною мобільних сенсорних мереж. Дані з окремих вузлів надсилаються від вузла до вузла через мережу до шлюзу, де вони зазвичай потрапляють на "супер - вузол" або сервер з більшими можливостями обробки.

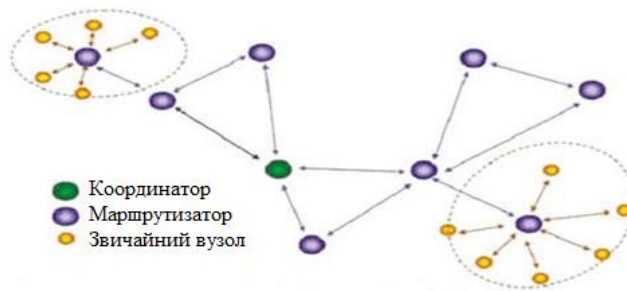


Рис.1.1 Архітектура мобільної сенсорної мережі

Топологія мережі є важливим представленням стану мережі, оскільки вона містить велику кількість даних про підключення та активні вузли, які використовуються в даний момент. У цій схемі кожен вузол використовує один радіоканал для зв'язку з базовою станцією. Оскільки енергетичні ресурси мобільних сенсорних мереж обмежені, методи збору топологічної інформації

повинні бути малопотужними. Розробка топології сенсорної мережі може відбуватися одним з двох способів, в залежності від вимог предметної області: або топологія "зірка" (ієрархічна топологія), або топологія "мультихоп" (точка-точка, однорідна топологія). (точка-точка, однорідна топологія). Вони можуть створити топологію "зірка", як показано зліва на рисунку 1.2, коли діапазони радіопередачі сенсорних вузлів досить великі і вузли можуть надсилати свої дані безпосередньо на базову станцію. У цій схемі кожен вузол використовує один радіоканал для зв'язку з базовою станцією. Однак, оскільки сенсорні мережі часто охоплюють значні географічні території, необхідно зменшити потужність радіопередавача для економії енергії. Як наслідок, передача через "мультихоп" є більш типовим сценарієм для сенсорних мереж. (показано праворуч на рисунку 1.2). Вузли в цій топології повинні виступати в ролі транзитних вузлів для інших вузлів на додаток до збору і передачі власних даних. Щоб передати інформацію від інших вузлів до базової станції, вони повинні взаємодіяти. Це піднімає питання маршрутизації, що є однією з найбільш важливих проблем, з якими стикаються мережі WSN. Маршрутизація - це робота по визначенню шляху, який включає в себе кілька кроків ретрансляції від вузла до базової станції. Коли вузол виступає в ролі транзитного вузла для декількох маршрутів, він часто має можливість попередньої обробки даних датчиків, що може призвести до видалення дублікатів даних або агрегування даних, які можуть бути стиснуті в порівнянні з початковим станом.

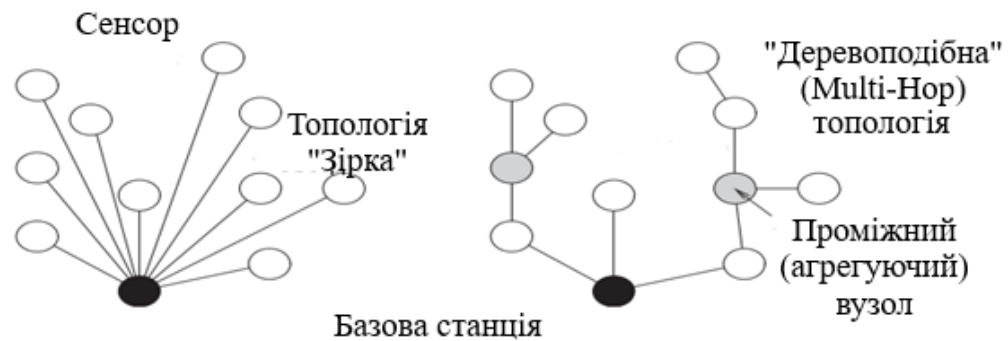


Рис.1.2 «Однострибкова» і «багастрибкова» топологія в сенсорних мережах

Що стосується топології "зірка", то передбачається, що мережа складається з двох різних типів об'єктів: повнофункціональних об'єктів та об'єктів з обмеженою функціональністю. Об'єкти першого типу слугують координаторами сегментів мережі, розділяючи всю мережу на сегменти. об'єкти першого типу можуть спілкуватися один з одним та з об'єктами другого типу. Взаємодіяти можуть лише пристрої першого та другого типу. Повноцінно функціонуючі пристрої можуть бути стаціонарними і живитися від зовнішніх джерел через зростаючі вимоги. Невелика кількість робочих місць, наприклад, у промисловому секторі, може вимагати використання цієї техніки організації мережі.

Другий метод організації мережі - це "однорідна" топологія, в якій всі об'єкти можуть взаємодіяти один з одним в межах зони видимості і мережу не потрібно ділити на кластери. Однак, вся мережа може бути розділена на сегменти, які або управляються координаторами, або ні. Такий метод побудови мережі дозволяє організовувати більш складні мережеві конфігурації та адаптувати такі мережі для виконання більш складних і незвичайних завдань. Цей метод дозволяє окремим об'єктам самостійно структурувати мережу і належним чином реагувати на зміни в архітектурі мережі з плином часу, що призводить до гнучкості, про яку йшлося вище.

1.2 Характерні особливості МСМ

Взагалі кажучи, мобільні сенсорні мережі (MCM) - це мережа вузлів, які спільно виявляють і контролюють навколишнє середовище, забезпечуючи взаємодію між людьми або комп'ютерами і навколишнім середовищем [1]. В даний час у WSN зазвичай зустрічаються сенсорні вузли, виконавчі вузли, шлюзи та клієнти. Мережі створюються шляхом самоуправління великою кількістю сенсорних вузлів, які випадковим чином розміщуються в межах або поблизу регіону моніторингу (поля виявлення). Сенсорні вузли зберігають записи даних, які вони отримали, для стрибкоподібної передачі вздовж інших сенсорних вузлів. Відстежувані дані можуть оброблятися багатьма вузлами під час передачі, щоб досягти вузлів-шлюзів після маршрутизації через ряд переходів, щоб потрапити до вузла управління через Інтернет або супутник. Через вузол адміністрування користувач налаштовує і контролює WSN, відправляючи моніторингові місії і збираючи відстежувані дані.

Ціна обладнання для WSN значно знизилась завдяки розвитку супутніх технологій, а використання WSN за межами військової сфери неухильно зростає і охоплює промислові і комерційні застосування. Стандарти для технології WSN, такі як WirelessHart, ISA 100.1a, Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation (WIA-PA) і т.д., були добре розроблені в цей час. Крім того, ринок додатків BSM в цілому буде швидко розширюватися в міру розвитку нових режимів застосування BSM в промисловій автоматизації і побутових додатках.

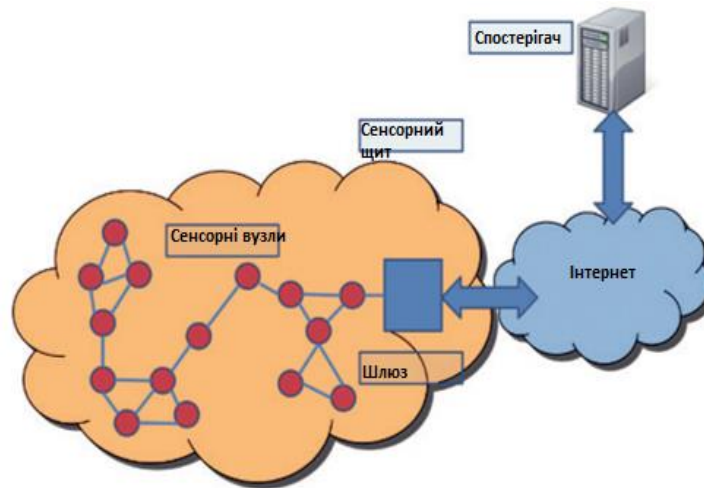


Рис 1.3. Мобільні сенсорні мережі

1.2.1 Сенсорні вузли

Однією з основних частин мобільних сенсорних мереж (МСМ) є сенсорні вузли, які часто називають вузлами датчиків або сенсорами. Вони використовуються для збору та передачі даних про навколишнє середовище на базову станцію або інший приймач, таких як температура, вологість, світло, рух тощо.

Основна мета вузлів датчиків полягає в зборі і передачі інформації з фізичного середовища, а також виконанні різних функцій, пов'язаних зі збором і обробкою даних. Основні складові вузлів датчиків включають:

1. Датчики: Вони відповідають за збір фізичних параметрів навколишнього середовища. Наприклад, датчики температури, вологості, світла, руху, звуку тощо. Ці датчики можуть бути як вбудовані в сам вузол, так і під'єднані до нього ззовні.

2. Мікроконтролер: Він відповідає за керування роботою сенсорного вузла. Мікроконтролер керує енергоефективними режимами роботи, аналізує дані з датчиків і передає дані через бездротовий інтерфейс. Він також запускає алгоритми обробки сигналів.

3. Бездротовий модуль: Це ключовий компонент, що забезпечує бездротову комунікацію між вузлами датчиків та іншими пристроями в мережі. Бездротовий модуль може використовувати різні бездротові протоколи, такі як

ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, LoRa і т.д., для передачі даних на базову станцію або інший вузол в мережі.

4. Енергоджерелаційна система: Через обмеженість джерел енергії, які часто мають сенсорні вузли, система електроживлення набуває вирішального значення. Вона може складатися з паливних елементів, сонячних панелей, акумуляторів або пристроїв, які вловлюють енергію коливань або вібрацій навколишнього середовища для забезпечення стабільного електропостачання.

5. Система управління енергією: Завдяки такому підходу можна ефективно керувати енергоспоживанням сенсорного вузла. Щоб збільшити час роботи вузла від одного заряду, він може використовувати алгоритми енергозбереження, сплячий режим, адаптивне керування живленням та інші стратегії.

6. Програмне забезпечення: Вбудоване програмне забезпечення у вузлах датчиків керує їхньою роботою. Воно може включати в себе драйвери датчиків, протоколи з'єднання, логіку обробки даних, логіку управління енергоспоживанням та інші речі, необхідні вузлу для належної роботи.

1.2.2 Технологія мініатюризації датчиків

Розвиток сучасних технологій та популярність мобільних сенсорних мереж зумовлюють необхідність створення компактних, енергоефективних, але потужних датчиків. Цю проблему вирішує технологія мініатюризації сенсорів, яка дозволяє зменшувати розміри сенсорів без шкоди для їхньої функціональності та точності вимірювань.

Зменшення фізичних розмірів сенсорів є однією з ключових цілей мініатюризації сенсорів. Для цього використовуються нові технології виробництва і матеріали. Наприклад, датчики меншого розміру можуть бути виготовлені з використанням наноматеріалів і наноструктур. Іншою перспективною технологією, яка дозволяє виробляти мініатюрні датчики за допомогою мікрофабрикації, є мікроелектромеханічні системи (MEMS).

Енергоефективність сенсорів є важливим компонентом мініатюризації.

Енергоефективність стає вирішальним фактором у мобільних сенсорних мережах, оскільки багато вузлів покладаються на батареї або інші обмежені джерела енергії. Менші датчики потребують менше енергії для роботи, що подовжує термін служби батареї. Енергоспоживання датчиків можна зменшити за допомогою спеціальних конструкцій, включаючи малопотужні інтерфейси, енергозберігаючі цикли сну і енергозберігаючі алгоритми.

Третім аспектом технології мініатюризації датчиків є забезпечення їхньої точності та надійності. Хоча мініатюрні датчики мають обмежений простір для встановлення компонентів, важливо забезпечити високу точність і стабільність вимірювань. Це може бути досягнуто за допомогою удосконалених алгоритмів компенсації похибок, високоякісних матеріалів і деталей, а також дотриманням вимог до калібрування та метрології[2].

Можливих застосувань мініатюризації датчиків безліч. Вона може застосовуватися в різних сферах, включаючи створення мініатюрних датчиків для імплантації, моніторинг стану обладнання в промисловості, вимірювання параметрів ґрунту в сільському господарстві та збір кліматичних даних.

Насамкінець, важливим напрямком розвитку є технологія зменшення розмірів сенсорів у мобільних сенсорних мережах. Вона дозволяє розробляти компактні, точні та енергоефективні датчики, які можуть миттєво збирати достовірні дані. Це створює нові можливості для спостереження та управління різними промисловими процесами. Ще більш компактні та потужні мобільні сенсорні мережі стануть можливими з подальшим розвитком технологій мініатюризації сенсорів[3].

1.2.3 Технологія отримання енергії з навколишнього середовища

Питання забезпечення стабільного живлення сенсорних вузлів стає все більш актуальним у сучасному світі, оскільки мобільні сенсорні мережі все частіше використовуються в різних галузях промисловості. Технологія збору енергії з навколишнього середовища дозволяє вирішити цю проблему, забезпечуючи сенсорні вузли енергією з навколишнього середовища.

Сонячна енергія є одним з основних джерел енергії з навколишнього середовища. Сенсорні вузли можуть перетворювати сонячне випромінювання в електричну енергію за допомогою сонячних панелей. Це особливо добре працює у світлих місцях, таких як дахи або відкриті простори. Ви можете отримувати енергію без підключення до електромережі завдяки сонячним панелям, які можна вбудувати прямо в корпус сенсорного вузла[4].

Сенсорні вузли в мобільних сенсорних мережах можуть житися від різних джерел енергії навколишнього середовища, окрім сонячної енергії. Наприклад, п'єзоелектричні матеріали або електромагнітні індуктори можуть використовуватися для уловлювання енергії вібрацій, коливань або руху. Термоелектричні матеріали також можна використовувати для виробництва енергії, використовуючи тепло та різницю температур.

Технологія збору енергії з навколишнього середовища, однак, також має значні труднощі. Перш за все, кількість зібраної енергії може бути обмеженою, особливо в умовах низької освітленості, низької вібрації або низьких температур. Як наслідок, вдосконалення систем збору енергії та застосування енергозберігаючих технологій стають критично важливими завданнями. Крім того, для збору та перетворення енергії потрібне спеціальне обладнання, яке може займати певний простір у блоці датчика та впливати на його розмір і вагу[5].

Використання технології збору енергії навколишнього середовища для мобільних сенсорних мереж має значний потенціал, незважаючи на певні труднощі. Вона дозволяє розробляти автономні сенсорні вузли без необхідності постійного підключення до мережі або заміни батарей. Це підвищує їхню портативність, зручність використання та доступність у важкодоступних або ізольованих регіонах. Оскільки системи можуть працювати на відновлюваних джерелах енергії, збір енергії з навколишнього середовища також може зменшити їхній негативний вплив на навколишнє середовище.

1.3 Технологія мережевого доступу

Пристрої між магістральною мережею і користувацькими терміналами є частиною мережі доступу, яка може мати довжину від кількох сотень метрів до кількох миль. Таким чином, для її опису ефективно використовується термін "остання миля".

Мережа доступу взяла на себе роль вузького місця мережевої системи, оскільки магістральна мережа, як правило, використовує оптоволоконну конструкцію з високою швидкістю передачі.

Через відкриту природу бездротових каналів, конфлікти виникатимуть у часовому, просторовому або частотному вимірах, коли канал використовується спільно кількома користувачами, як показано на (Рис. 1.3). Для того, щоб гарантувати, що кілька користувачів можуть підключатися і спілкуватися один з одним на одному каналі, технології мережевого доступу контролюють і координують використання ресурсів каналу.

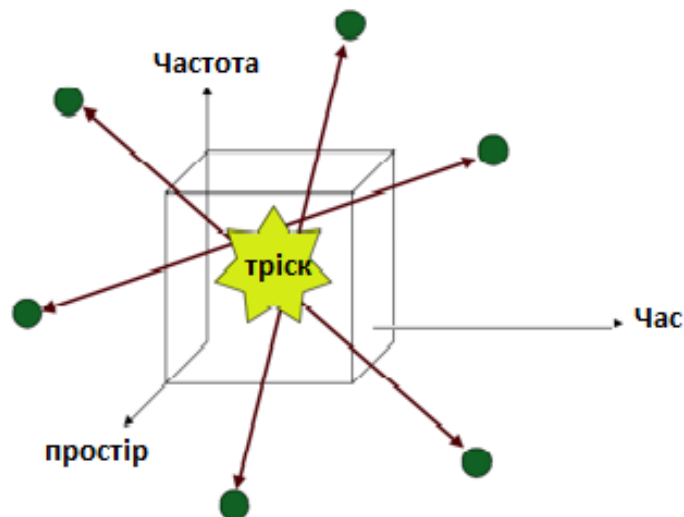


Рис. 1.3. Технології доступу [6]

Існуючі технології доступу можна розділити на чотири групи залежно від відстані та швидкості доступу: бездротова локальна мережа (WLAN), бездротова міська мережа (WMAN), бездротова персональна мережа (WPAN)

та бездротова глобальна мережа (WWAN). (WWAN). Однак потреби додатків BSM не сумісні із загальною тенденцією розвитку високих швидкостей передачі даних. Нижче наведені основні причини:

- Робоче середовище BSM, як правило, досить жорстке з точки зору надійності. Надійний зв'язок, заснований на обмежених ресурсах каналу, є нагальною проблемою, яку необхідно вирішувати через несприятливі умови навколишнього середовища з вузькосмуговими багаточастотними шумами, завадами і багатопроблемними ефектами.
- Додатки WSN та IoT мають більш високі вимоги до можливостей роботи в реальному часі, ніж інші додатки. Невелика заминка може спричинити значні проблеми. Як наслідок, у багатьох додатках необхідно забезпечити щільне з'єднання в реальному часі.
- Низьке енергоспоживання має важливе значення для тривалої роботи пристроїв, що живляться від батареї, а також для зниження витрат на обслуговування з точки зору енергоефективності. Це ще одна обов'язкова умова для мобільних мереж і додатків Інтернету речей (IoT), особливо для пристроїв зі складними для заміни акумуляторами.

Розвиток технологій мереж доступу вже значно просунувся у відповідності до сучасних вимог, зокрема, для додатків BSM. Репрезентативними технологіями доступу, які є більш методичними і заслуговують на увагу, є IEEE 802.15.4e [7], Bluetooth 4.0, який орієнтований на промислові мережі WSN, і IEEE 802.11TM WLAN [8], який орієнтований на Інтернет речей.

1.4 Історія і промислові стимули розвитку MCM

Військове застосування, зокрема, моніторинг у зоні бойових дій, послужило натхненням для створення WSN. Зараз вони складаються з розрізнених, автономних систем, які використовують датчики для спостереження за фізичними умовами у світі. Ці системи застосовуються в промисловій інфраструктурі, автоматизації, охороні здоров'я, бізнесі та інших

споживчих секторах.

На початку 1980-х років Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США (DARPA) запустило ініціативу розподілених сенсорних мереж (DSN) для американських військових, і саме тоді вперше почалися дослідження WSN. На той час вже працювала мережа Агентства передових дослідницьких проєктів (ARPANET), яка налічувала 200 організаторів в університетах і науково-дослідних установах. Ідея DSN полягала в тому, щоб мати велику кількість дешевих, широко розосереджених сенсорних вузлів, які працюють разом, але незалежно, а інформація надсилається до вузла, який може використати її найбільше. Хоча DSN була метою перших дослідників сенсорних мереж, технологія була не зовсім готова. Зокрема, кількість можливих застосувань була обмежена, оскільки датчики були досить великими (тобто розміром з коробку з-під взуття або більше). Крім того, бездротовий зв'язок не був ключовим компонентом перших DSN.

Останнім часом у дослідженнях DSN було досягнуто значного прогресу, що ще більше наблизило їх до початкової мети завдяки останнім досягненням у комп'ютерних, комунікаційних та мікроелектромеханічних технологіях. 1998 року розпочалася нова хвиля досліджень WSN, і зараз вони привертають все більше уваги та залучення з усього світу. Нинішня хвиля досліджень сенсорних мереж зосереджена на мережевих технологіях і мережевій обробці інформації, придатних для сенсорних вузлів з обмеженими ресурсами і високодинамічним спеціальним контекстом. Крім того, сенсорні вузли зменшилися в розмірах (від розміру колоди карт до розміру пилінки) і знизилися в ціні, що призвело до появи численних нових цивільних застосувань сенсорних мереж, включаючи моніторинг навколишнього середовища, сенсорні мережі транспортних засобів і сенсорні мережі тіла.

Розпочавши активну дослідницьку програму під назвою SensIT, DARPA знову очолила нову хвилю досліджень сенсорних мереж і надала сучасним сенсорним мережам додаткові можливості, включаючи спеціальні мережі, динамічні запити і завдання, перепрограмування і призначення. На

сьогоднішній день WSN вважаються однією з найбільш значущих технологій 21-го століття. Наприклад, WSN є частиною національних стратегічних дослідницьких ініціатив Китаю. Як наслідок, комерціалізація WSN зростає, і з'являються численні нові технологічні фірми, такі як Dust Networks і Crossbow Technology (яка з'єднує фізичний і цифровий світи).

Однією з найважливіших сфер використання MCM сьогодні є промислова автоматизація. За оцінками Freedonia Group, частка промислових датчиків на світовому ринку становить 11 мільярдів доларів. Понад 100 мільярдів доларів США було витрачено на встановлення (переважно витрати на кабелі) та споживання. США. Суттєвою перешкодою для розвитку промислових комунікаційних технологій є їхня висока вартість. Через вищезгадані обмеження онлайн-моніторингу, технологія BSM, яка забезпечує "повсюдне зондування" протягом усього промислового процесу, має потенціал для отримання значних параметрів. Для підвищення якості продукції та зменшення споживання енергії ці фактори є важливими складовими оптимального управління.

За даними ON World, кількість бездротових підключених датчиків і виконавчих механізмів, також відомих як сенсорні точки, розгорнутих по всьому світу в період з 2011 по 2016 рік, збільшиться на 553%. Для 39% цих нових застосувань, які тільки можливі, потрібна бездротова сенсорна мережа. Пристрої WSN складатимуть 15% всіх точок вимірювання і контролю промислового обладнання до 2014 року і 33% до 2016 року. Три чверті промислового доходу BSM зараз припадає на переробну промисловість, причому нафтова та енергетична галузі переживають найшвидше зростання. Для відновлення 200 000 нафтових свердловин PetroChina використовує ініціативи Інтернету речей на своїх нафтових родовищах. Онлайн-моніторинг буде використовуватися технологією BSM для вимірювання видобутку нафтових свердловин і гарантування безпеки виробництва в рамках цифрової трансформації нафтових свердловин.

Технологія BSM має вирішальне значення для моніторингу безпеки

обладнання для передачі та перетворення електроенергії, а також для ремонту мільярдів розумних лічильників в енергетичному секторі, який в даний час модернізує свою енергетичну інфраструктуру.

Таблиця 1.1

Порівняння традиційних мереж і МСМ

Традиційні мережі	Мобільні сенсорні мережі
Загальноцільові; багато додатків .	Одноцільові; обслуговують одиндодаток.
Типові обмеження відносяться до пропускної здатності і затримкам; споживання енергії не розглядається.	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 відомості по мережі можливе і централізоване управління здійсненне.	Більшість рішень приймається без центрального керуючого вузла.

Мобільні сенсорні мережі (МСМ) мають багато потенційних застосувань у різних галузях. Деякі з основних сфер застосування мобільних сенсорних мереж включають

Моніторинг навколишнього середовища: WSN можна використовувати для моніторингу різних параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість, якість повітря і води. Ця інформація може бути використана для управління природними ресурсами і прогнозування стихійних лих.

Промисловий моніторинг і контроль: Мережі WSN можна використовувати для моніторингу і контролю різних промислових процесів, таких як виробництво, транспортування і логістика. Це може підвищити ефективність і знизити витрати.

Моніторинг охорони здоров'я: Мережі можна використовувати для моніторингу стану здоров'я пацієнтів і надання даних в режимі реального часу медичним працівникам. Це може допомогти у ранньому виявленні захворювань і покращити результати лікування.

Розумний будинок і автоматизація будівель: Мережі WSN можна використовувати для автоматизації різних процесів в будинках і будівлях, таких як освітлення, контроль температури і системи безпеки. Це може підвищити енергоефективність і знизити витрати.

Сільське господарство: WSN можна використовувати для моніторингу різних параметрів у сільському господарстві, таких як вологість ґрунту, температура і вологість. Це може допомогти фермерам оптимізувати врожайність і зменшити використання води.

Військове застосування: WSN можна використовувати у військових цілях, таких як спостереження і розвідка.

Моніторинг стану будівель: Мережі можна використовувати для моніторингу стану таких споруд, як мости і будівлі. Це може допомогти у ранньому виявленні структурних проблем і запобігти аваріям.

Моніторинг дорожнього руху: WSN можна використовувати для моніторингу транспортних потоків і надання даних в режимі реального часу транспортним органам. Це може допомогти в оптимізації транспортного потоку і зменшити затори.

Моніторинг дикої природи: Мережі можна використовувати для моніторингу популяцій та поведінки диких тварин у їхніх природних середовищах існування. Це може допомогти в природоохоронних заходах і в розумінні впливу людської діяльності на дику природу.

Боротьба зі стихійними лихами: Мережі можна використовувати для

виявлення і моніторингу стихійних лих, таких як землетруси, повені та лісові пожежі. Це може допомогти у своєчасній евакуації постраждалих районів і в управлінні зусиллями з надання допомоги.

Моніторинг спорту та фітнесу: Мережі WSN можна використовувати для моніторингу здоров'я і продуктивності спортсменів і любителів фітнесу. Це може допомогти поліпшити їхні тренувальні результати.

Розваги та ігри: WSN можна використовувати в розважальних та ігрових додатках, таких як ігри з прив'язкою до місцезнаходження і доповнена реальність.

Загалом, мобільні сенсорні мережі мають широкий спектр потенційних застосувань і можуть використовуватися практично в будь-якій ситуації, де потрібен моніторинг і збір даних в режимі реального часу.

Висновки

Огляд особливостей мобільних сенсорних мереж (MCM) надає нам цінний інсайт у цю технологію, яка використовується в різних галузях, включаючи моніторинг навколишнього середовища, медичні додатки, промислові системи та багато інших.

Структура MCM складається з бездротових вузлів датчиків, які забезпечують збір і передачу даних. Ці вузли володіють характерними особливостями, такими як мініатюризація датчиків на основі MEMS технології та здатність збирати енергію з навколишнього середовища.

Технологія мережевого доступу в MCM є важливою складовою, оскільки вона забезпечує ефективну комунікацію між вузлами мережі, що дозволяє передавати дані для подальшого аналізу та використання.

Історія та промислові стимули розвитку MCM свідчать про постійний прогрес і зацікавленість у використанні цієї технології. Вона стала ключовим інструментом для вирішення різних завдань, починаючи від збору даних про оточуюче середовище до управління та оптимізації процесів у різних сферах діяльності.

Мобільні сенсорні мережі відкривають безліч можливостей у зборі та передачі даних, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та поліпшення управління процесами. Подальший розвиток технології МСМ вимагає постійного вдосконалення структури, датчиків, технологій збору енергії та мережевого доступу, а також врахування історичного контексту та промислових стимулів.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Топологія сенсорних мереж

WSN зазвичай складається з декількох вузлів сенсорної мережі та інтернет-шлюзу.

Нижче описано загальну процедуру розгортання WSN (рис. 2.1): Щоб ідентифікувати один одного, вузли сенсорної мережі спочатку транслюють свій поточний стан в навколишнє середовище і слухають оновлення від інших вузлів.

По-друге, використовується певна топологія для організації вузлів сенсорної мережі у зв'язану мережу. (лінійна, зірка, дерево, сітка тощо). Потім у побудованій мережі розраховуються відповідні шляхи для передачі даних зондування. Вузли сенсорної мережі часто живляться від батарейок, тому відстань передачі даних між вузлами WSN обмежена. У відкритому зовнішньому середовищі з прямою видимістю відстань передачі може становити від 800 до 1000 метрів. У випадку захищеного приміщення вона значно зменшиться до кількох метрів. Сенсорна мережа використовує багатоступеневий механізм передачі даних для збільшення покриття мережі. Іншими словами, вузли сенсорної мережі можуть передавати і приймати дані. Вузол-джерело, який є першим вузлом сенсорної мережі, доставляє дані до сусіднього вузла для передачі на шлюз. На шляху до шлюзу сусідній вузол передає дані іншому сусідньому вузлу. Поки дані не досягнуть шлюзу, місця призначення, пересилання повторюється. Існує можливість адаптувати протоколи і деякі методи реалізації WSN до існуючих конструкцій і технологій бездротових і дротових комп'ютерних мереж. Однак, самоорганізація, самоадаптація, низька енергія вузла і хиткі лінії передачі є характерними рисами WSN.

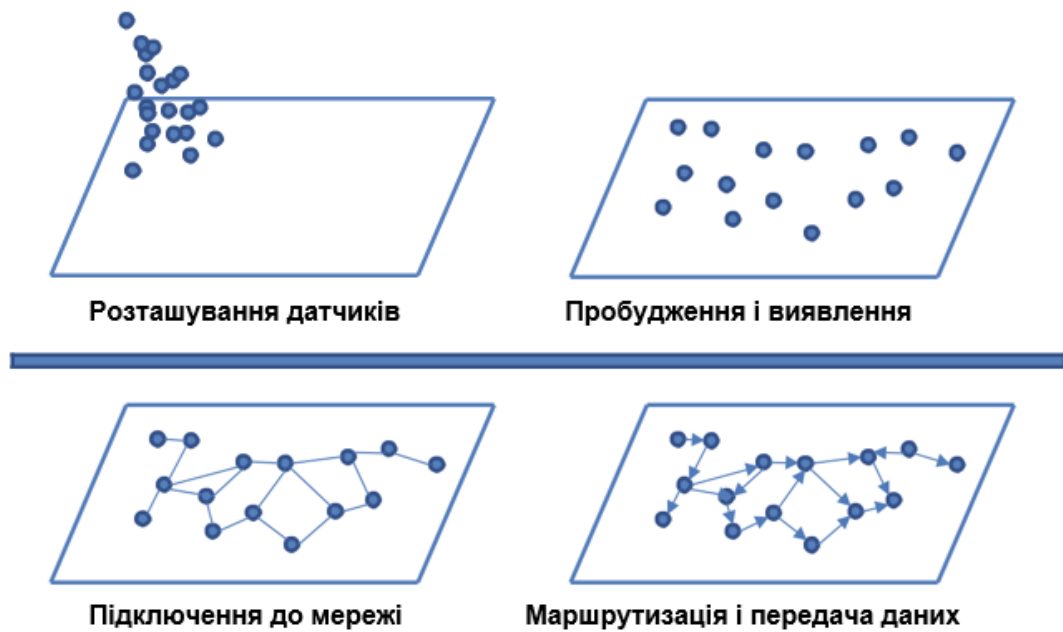


Рис 2.1 Процес організації та передачі даних MCM

2.1.1 Самокеровані мережеві технології

Надійні самокеровані мережеві технології мають вирішальне значення в контексті мобільних сенсорних мереж (MCM), оскільки вони забезпечують автоматичне адміністрування та оптимізацію роботи мережі для гарантування надійності, гнучкості та ефективності. Як видно з (рис. 2.2), стратегія управління вузлами мережі, що самоорганізується, може значно підвищити надійність мережі. Це призвело до розвитку технології інтелектуальних mesh-мереж. У спеціальній технології Smart Mesh вузол спочатку відстежує своїх сусідів і вимірює рівень їхнього сигналу, перш ніж вибрати відповідного для синхронізації свого часу і надіслати запит на приєднання. Згодом запит надсилається сусіднім вузлом на шлюз. Після отримання запиту шлюз виділяє вузлу мережеві ресурси. Для підвищення надійності мережі сенсорні вузли можуть мати два або більше каналів передачі даних на основі комірчастої мережі. Мережа з синхронізованим протоколом зв'язку (TSMP) [9] може забезпечити самокеровану мережу та мережу зі 100 вузлів.

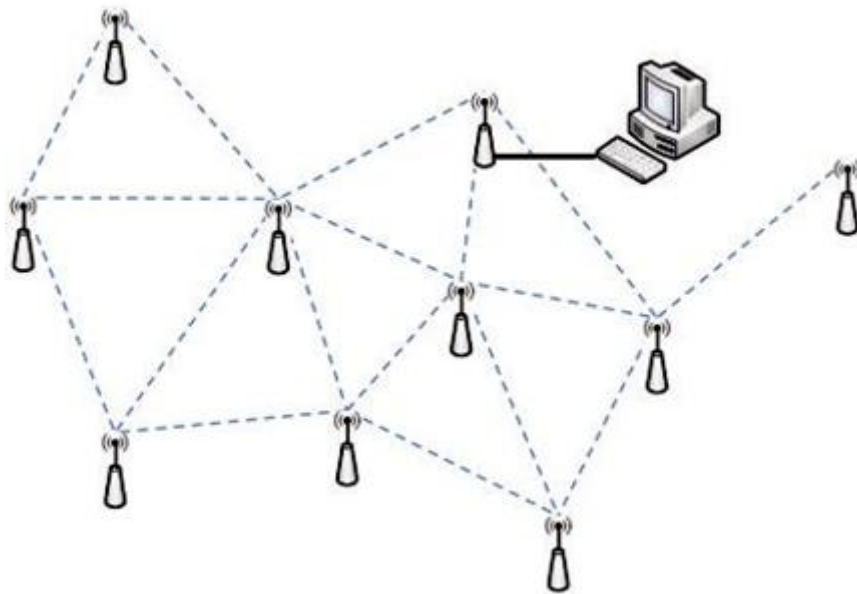


Рис. 2.2 Коміркова самокерована мережа

Давайте розглянемо деякі основні аспекти самокерованих надійних мережевих технологій у мобільних сенсорних мережах:

Самокеровані мережі мають можливість встановлювати і налаштовувати себе з мінімальною участю користувача. Вони можуть будувати маршрути на основі енергетичних обмежень та інших параметрів, призначати ролі вузлам (наприклад, базовим станціям, вузлам спостереження) і автоматично генерувати топологію мережі.

Самокеровані мережі мають можливість автоматично керувати ресурсами мережі, включаючи обчислювальну потужність, пропускну здатність і енергію. Вони можуть керувати енергоспоживанням, вибирати найкращі шляхи для передачі даних, виявляти та усувати несправності мережі, розподіляти роботу між вузлами для збалансування навантаження.

Самокеровані мережі можуть використовувати алгоритми машинного навчання і аналізу даних для виявлення дефектів, прогнозування подій і виявлення закономірностей у даних датчиків. Це може підвищити надійність, ефективність і продуктивність мережі.

Мобільні сенсорні мережі мають обмежений запас енергії, тому можна розумно регулювати енергетичні режими вузлів, використовуючи самокеровані

надійні мережеві технології. Для збільшення тривалості життя мережі можна перевести її в сплячий режим, вимкнути зайві функції або увімкнути енергозберігаючі протоколи.

Самокерована, надійна мережева технологія може підтримувати зв'язок між вузлами в разі збою мережі, забезпечувати точність передачі даних, виявляти та усувати проблеми. Вони також можуть гарантувати відмінну якість обслуговування і визначати пріоритети передачі даних на основі потреб додатків.

Важливим кроком у підвищенні ефективності, надійності та продуктивності мобільних сенсорних мереж є розробка самокерованих надійних мережевих технологій. Для додатків WSN вони створюють нові можливості в різних галузях, включаючи Індустрію 4.0, розумні міста, охорону здоров'я та багато інших. Самокеровані надійні мережеві технології все ще перебувають на стадії розробки, і дуже важливо вирішити питання безпеки, конфіденційності, енергоефективності та інтеграції технологій.

У мобільних сенсорних мережах самокеровані надійні мережеві технології є потужним інструментом для підвищення функціональності та продуктивності мережі, забезпечення надійної передачі даних та ефективного використання ресурсів. Їх використання може призвести до появи нових можливостей в різних галузях промисловості і сприяти розвитку Інтернету речей (IoT) і інтелектуальних систем.

2.1.2 Ефективні та доступні бездротові IP-з'єднання в сенсорних мережах

Сенсорні мережі - це розподілені системи, які збирають дані з численних крихітних вузлів, розкиданих по заздалегідь визначеній території, і надсилають їх на базову станцію або інший вузол мережі. Завдяки своїй гнучкості та мобільності, бездротові IP-з'єднання є популярним варіантом для забезпечення зв'язку між вузлами.

Управління ресурсами є одним з найважливіших компонентів успішного

бездротового IP-з'єднання. Численні стратегії, включаючи планування маршрутів, розподіл частот і управління потоками даних, можуть бути використані для максимального використання обмежених ресурсів, таких як пропускна здатність і енергія.

У сенсорних мережах планування маршруту спрямоване на вибір найкращого маршруту для передачі даних від датчиків до базової станції. Це може передбачати врахування таких елементів, як навантаження на мережу, енергоефективність та довжина маршруту.

Внутрішні адреси часто використовувалися в ранніх проектах сенсорних мереж для керування вузлами. Враховуючи її коротку довжину, адреса може бути реалізована у малопотужних вбудованих вузлах мережі. Несумісність внутрішньої системи управління адресами з IP-методом Інтернету зробила зв'язок між вузлами сенсорної мережі та вузлами звичайної IP-мережі більш складним. Тому необхідно вирішити питання об'єднання мережі WSN та IP-мережі. Кількість адрес IPv4 постійно зменшується, в той час як IPv6 забезпечує великий пул адрес, який ідеально підходить для різноманітних розгортань сенсорних мереж. Наслідком цього стала розробка малопотужної бездротової технології на основі IPv6, відомої як 6LoWPAN [10]. На комунікаційному рівні IEEE 802.15.4 6LoWPAN зазвичай використовує скорочений протокол IPv6. Завдяки введенню рівня адаптації між рівнем IP та канальним рівнем, що є надійним підходом для забезпечення адаптивності протоколу між мережею IPv6 та сенсорною мережею, як показано на (рис. 2.3), досягається стиснення заголовків та фрагментація пакетів скидання. Для забезпечення масштабованості, плавної інтеграції та надійного з'єднання між сенсорною мережею та IP-мережею в пристроях сенсорної мережі Sensinode на базі NanoStack [11] та TI на базі CC-6LoWPAN [12] використовується технологія 6LoPAN.

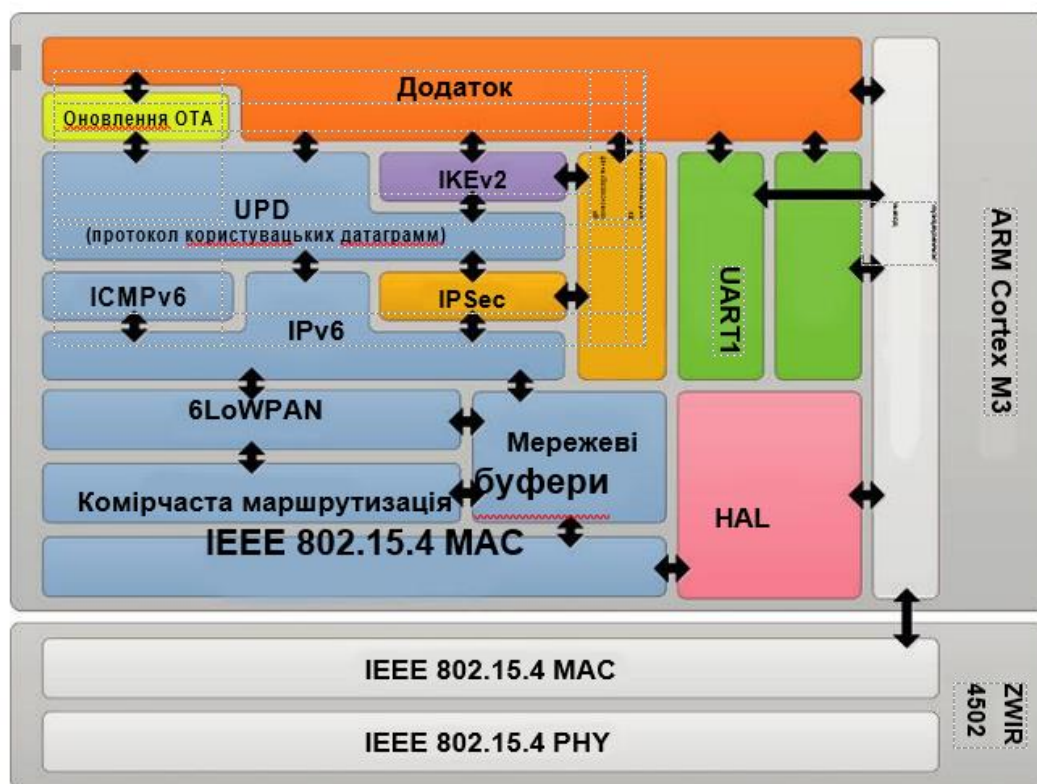


Рис. 2.3 Пакет протоколів 6LoWPAN

Ще одним важливим фактором ефективності бездротових IP-з'єднань є розподіл частот. Продуктивність мережі можна підвищити, забезпечивши безперешкодне використання всіх доступних частотних діапазонів. Запобігти перешкодам і гарантувати ефективне використання спектра можна за допомогою таких методів, як множинний доступ з часовим поділом каналів (TDMA) або множинний доступ з частотним поділом каналів (FDMA).

У сенсорних мережах наявність бездротових IP-з'єднань означає здатність мережі забезпечувати надійний зв'язок між вузлами. Для цього можуть використовуватися методи забезпечення якості обслуговування (QoS), такі як пріоритезація трафіку і системи виявлення та усунення помилок.

Ви можете виділити критичний трафік і надати йому пріоритет при передачі за допомогою пріоритизації трафіку. Наприклад, встановлення різних рівнів пріоритету може гарантувати, що обробка терміново необхідних даних буде здійснюватися в першу чергу.

Щоб підвищити надійність з'єднання і зменшити вплив шуму та інших

спотворень на передачу даних, можна використовувати процедури виявлення і виправлення помилок[13]. Ці механізми включають повторну передачу даних або використання кодування помилок.

2.1.3 Автономна технологія керування потоками

У сенсорних мережах технологія автономного керування потоком має вирішальне значення для забезпечення оптимального використання ресурсів та якісної передачі даних. У цьому дослідженні будуть розглянуті основні аспекти автономного керування потоком у мобільних сенсорних мережах.

Бездротова сенсорна мережа складається з багатьох вузлів, кожен з яких має обмежену кількість обчислювальної потужності, енергії та пропускної здатності. Вони використовуються для збору даних про навколишнє середовище та надсилання їх на базову станцію або інший приймач. У цих мережах управління потоком даних є ключовим компонентом для ефективної передачі даних та ефективної роботи мережі.

У сенсорних мережах технологія автономного керування потоком використовує розумні алгоритми і протоколи для керування потоком даних без необхідності сторонньої допомоги з боку мережевого адміністратора. Вона дозволяє вузлам обирати власні стратегії передачі даних на основі поточного стану мережі та доступних ресурсів.

У мобільних сенсорних мережах технологія автономного керування потоком дозволяє найкращим чином використовувати обмежені ресурси. Нижче наведено кілька методів оптимізації ресурсів[14]:

- Алгоритми планування маршрутів можуть використовуватися автономним керуванням потоком для вибору найкращого маршруту для передачі даних. Як результат, затримки невеликі, ресурси використовуються найкращим чином, а енергія споживається менше.
- Залежно від навантаження і вимог до даних, автономна технологія може адаптивно змінювати пропускну здатність мережі. Це сприяє підвищенню продуктивності та уникненню перевантаження мережі.

- У сенсорних мережах автономна технологія може ефективно управляти енергією, вимикаючи або обмежуючи активність вузлів, які в даний момент не потрібні. Це збільшує довговічність мережі та сприяє енергозбереженню.

2.2 Групування даних

Час автономної роботи, обчислювальна потужність, ємність сховища даних і пропускна здатність зв'язку для кожного вузла для передачі даних на вузол-поглинач є недостатніми в сценаріях сенсорних мереж з обмеженим енергоспоживанням. Це пов'язано з тим, що в сенсорних мережах з великим покриттям дані, що передаються сусідніми вузлами, мають певний рівень надмірності, що призводить до необхідності передавати дані незалежно на кожному вузлі, використовуючи при цьому пропускну здатність і енергію всієї сенсорної мережі, що скорочує термін служби мережі.

Для того, щоб запобігти вищезгаданим проблемам, були розроблені стратегії агрегації даних. Процес об'єднання багатьох копій інформації в одну копію, яка є ефективною і здатна задовольнити потреби користувачів сенсорних вузлів проміжного програмного забезпечення, відомий як агрегація даних.

Для того, щоб запобігти вищезгаданим проблемам, були розроблені стратегії агрегації даних. Процес об'єднання багатьох копій інформації в одну копію, яка є ефективною і здатна задовольнити потреби користувачів сенсорних вузлів проміжного програмного забезпечення, відомий як агрегація даних.

Економія енергії та достовірна інформація - дві переваги впровадження агрегації даних. У сенсорних мережах на обробку даних витрачається значно менше енергії, ніж на їх передачу. Як наслідок, процедури агрегації даних виконуються для усунення значної кількості дубльованих даних з локального комп'ютера та ресурсів зберігання вузла, щоб зменшити передачу та заощадити енергію. Складно гарантувати точність інформації, отриманої шляхом збору

невеликої вибірки даних з розрізнених сенсорних вузлів у складному мережевому середовищі. Тому для моніторингу даних з одного і того ж об'єкта необхідно співпрацювати з декількома датчиками, що значно підвищує точність і надійність зібраних даних.

Топологія мережі має значний вплив на те, наскільки добре працює метод агрегації даних. Далі, як показано нижче, ми можемо розглянути кілька методів агрегації даних з використанням топологій мережі "зірка", "дерево" та "ланцюжок". (Рис. 2.4)

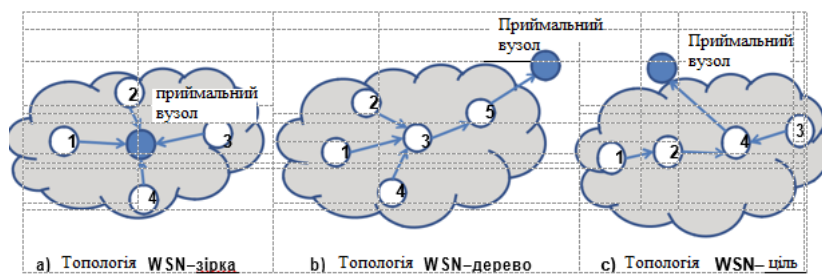


Рис. 2.4 Три види топологій МСМ: зірка, дерево, цепь.[6]

Погіршуючи продуктивність в інших сферах, технологія агрегації даних може зменшити споживання енергії та підвищити точність інформації. З одного боку, очікується, що середня затримка в мережі під час передачі даних зростатиме внаслідок пошуку вузлів агрегації, виконання дій з агрегації даних та очікування на надходження інших даних. З іншого боку, сенсорні мережі зазнають більших втрат даних, ніж традиційні мережі.

Агрегація даних може значно мінімізувати надлишковість даних, але вона також може призвести до ненавмисної втрати більшої кількості даних, що знижує надійність сенсорної мережі.

2.3 Синхронізація вузлів в сенсорних мережах

Для спільного моніторингу фізичних або екологічних факторів, таких як температура, звук, вібрація, тиск, рух і забруднення, в різних місцях, бездротова мережа складається з географічно розподілених автономних

пристроїв[8]. Кожен пристрій має джерело енергії, що живиться від батареї, процесорну схему для обробки та передачі даних у мережі, трансивер для бездротового з'єднання та сенсорні компоненти.

Для спільного моніторингу фізичних або екологічних факторів, таких як температура, звук, вібрація, тиск, рух і забруднення, в різних місцях, бездротова мережа складається з географічно розподілених автономних пристроїв. Кожен пристрій має джерело енергії, що живиться від батареї, процесорну схему для обробки та передачі даних у мережі, трансивер для бездротового з'єднання та сенсорні компоненти.

Більшість мережевих вузлів є статичними та обмеженими в ресурсах. Вони збирають дані та надсилають їх до "сінка" - централізованого процесора - для додаткової обробки. Одним з ключових факторів, що враховуються при оцінці продуктивності мережі, є термін служби всієї бездротової сенсорної мережі, який визначається як відсоток часу, коли бездротові вузли перебувають в автономному режимі, а не термін служби окремого пристрою.

Датчики повинні бути побудовані таким чином, щоб протистояти складним географічним та екологічним умовам. Зазвичай, додаткові датчики або пристрої використовуються для досягнення надмірності та компенсації несправних. (наприклад, апаратна несправність, загальне споживання енергії батареї). Багато застосунків потребують синхронізації часу, яка має на меті встановити стандартну шкалу часу в усій мережі.

Синхронізація часу необхідна для методів керування доступом, таких як TDMA, щоб точно планувати доступ до середовища, не спричиняючи колізій. Крім того, оскільки мобільних сенсорні мережі мають обмежені енергетичні ресурси, використовуються стратегії енергозбереження, щоб зменшити загальне енергоспоживання мережі. Точна синхронізація між вузлами мережі необхідна для того, щоб вузли могли вмикати та вимикати свої приймачі в потрібний час. Злиття даних використовується в багатьох сферах. Для прийняття рішення дані, зібрані на декількох вузлах, об'єднуються і передаються на вузол-поглинач. Щоб завершити роботу, ці вузли співпрацюють

і координують свої дії один з одним. Для отримання точної оцінки події для певних застосувань, таких як виявлення цілей, необхідна точна синхронізація між вузлами.

Бездротові мережі не можуть використовувати ті ж традиційні методи синхронізації, що і звичайні мережі. NTP, який широко використовується в Інтернеті, не є енергоефективним і занадто складним для розгортання. З іншого боку, GPS непрактичний через розмір і вартість гаджета, який необхідно підключати до вузла мережі. Крім того, GPS-сигнали часто недоступні, оскільки датчики часто використовуються в складних ситуаціях.

Схеми генератора і лічильника складають схему комп'ютерного годинника. Лічильник, який представляє локальний тактовий сигнал $C(t)$ вузла мережі, збільшує своє значення на основі кутової частоти генератора. В ідеальному випадку кутова частота є постійною. Таким чином, тактова швидкість змін дорівнює 1.

Через фізичні коливання, такі як температура, вібрація та тиск, кутова частота змінюється, і комп'ютерний годинник дрейфує. Локальний годинник вузла і можна віднести до реального часу t наступним чином:

$$C_i(t) = a_i t + b_i \quad (2.1)$$

Де a_i - це зміщення, а b_i зсув годинника i -того вузла. Зміщення позначає частоту годинника, а зсув - це різниця у значенні від реального часу t . Використовуючи рівняння (1), ми можемо порівняти локальні тактові частоти двох вузлів у мережі, скажімо, вузол 1 і вузол 2:

$$C_1(t) = a_{12} \cdot C_2(t) + b_{12} \quad (2.2)$$

Ми називаємо a_{12} відносним зміщенням, а b_{12} відносним зсувом між тактовими частотами вузла 1 і вузла 2. Якщо два тактові сигнали ідеально синхронізовані, тоді їх відносний дрейф дорівнює 1, тобто годинники мають однакову швидкість. Їх відносний зсув дорівнює нулю, тобто вони мають одне і те ж значення в цей момент.

Тактова частота і зміщення вузла мережі можуть бути використані для зміни місцевого часу на основі попередніх формул. Деякі схеми побудовані

таким чином, щоб автоматично змінювати зміщення вузла або тактову частоту до стандартної шкали часу.

2.3.1 Фактори спричинення помилок синхронізації часу

Синхронізація часу має вирішальне значення в мобільних сенсорних мережах, оскільки багато розподілених вузлів працюють разом для збору та передачі даних. За допомогою точної синхронізації часу вузли можуть синхронізувати свої дії, забезпечити оптимальне планування передачі даних і зменшити кількість збоїв у мережі. Основні причини проблем синхронізації часу в мобільних сенсорних мережах будуть розглянуті нижче:

1. Помилки у внутрішніх вузлах

Внутрішні дефекти вузлів сенсорної мережі є однією з основних причин помилок синхронізації часу. Кожен вузол має власний внутрішній годинник, який може відставати від реального часу в залежності від внутрішніх факторів, таких як точність кварцового генератора або затримки часу обробки даних.

2. Затримки в передачі даних

Затримки передачі даних у мобільних сенсорних мережах можуть знизити точність синхронізації часу. Шляхи поширення сигналу, перешкоди, джерела шуму та інші аспекти, які впливають на час проходження сигналу від одного вузла до іншого, спричиняють затримки. Коли потрібна висока точність синхронізації, ці затримки можуть спричинити помилки у визначенні часу.

3. Неправильне налаштування протоколу

Через неправильне налаштування певні протоколи, що використовуються в мобільних сенсорних мережах для синхронізації часу, схильні до помилок. Неточна синхронізація часу та збільшення помилок може бути наслідком неправильного налаштування параметрів протоколу, зокрема часового інтервалу та коефіцієнтів затримки.

4. Фактори, пов'язані з навколишнім середовищем

На точність синхронізації часу в мобільних сенсорних мережах може впливати навколишнє середовище. Наприклад, коливання температури або

вологості можуть впливати на електронні компоненти вузлів і призводити до помилок у їхніх внутрішніх годинниках. Крім того, передачі сигналів синхронізації можуть заважати або спотворювати інші бездротові пристрої або джерела сигналу.

Багато алгоритмів синхронізації часу використовують обмін повідомленнями. Недетерміновані затримки, такі як тривалість доступу та поширення, ускладнюють точну синхронізацію вузла-одержувача з вузлом-джерелом, якщо один з вузлів доставляє пакет з часовою міткою[14].

Наступні компоненти зазвичай спричиняють помилки синхронізації:

- *Час надсилання* - це загальний час, необхідний для створення повідомлення і надсилання його до мережевого інтерфейсу. Операційні системи, які використовуються, сильно впливають на цей час.
- Час, необхідний для доступу до каналу, називається *часом доступу*. Загальний час доступу залежить від методу керування доступом до середовища (MAC), що використовується в кожній мережі, який схожий на множинний доступ з часовим поділом каналів (TDMA). В інших системах вузли мережі зазвичай чекають на час простою каналу, однак при TDMA вони повинні чекати, поки їхній слот почне передачу.
- *Час поширення*: Це час, необхідний для передачі повідомлення по повітрю від мережевого інтерфейсу відправника до мережевого інтерфейсу одержувача.
- Час, необхідний для того, щоб повідомлення було отримано через мережевий інтерфейс і відправлено на хостовий прикладний рівень, називається "*часом отримання*".

2.3.2 Вимоги до синхронізаційних схем у сенсорних мережах

Обмеження, що накладаються бездротовою мережею, забезпечують дотримання ряду специфікацій при розробці методів синхронізації часу. Зазвичай для оцінки будь-якої техніки синхронізації використовують такі показники:

- **Точність синхронізації:** Можливість досягнення високої точності синхронізації часу між вузлами мережі є однією з ключових вимог до систем синхронізації. Розташування вузлів, швидкість передачі даних, часові інтервали та інші мережеві фактори впливають на точність синхронізації. Точність синхронізації часто повинна бути на мікросекундному або навіть наносекундному рівні.

- **Енергоефективність:** У сенсорних мережах дуже важливо, щоб алгоритми синхронізації були енергоефективними, оскільки ці вузли мають обмежені енергетичні ресурси. Це означає, що процедура синхронізації не повинна споживати багато енергії і не повинна скорочувати тривалість життя вузлів. Використання енергозберігаючих методів і технологій, таких як розподілений протокол синхронізації, може підвищити енергоефективність.

- **Відмовостійкість:** У сенсорних мережах можуть траплятися збої в роботі окремих вузлів або мережі в цілому. Системи синхронізації повинні бути відмовостійкими і здатними продовжувати синхронізацію після відмови вузла або відновлення мережі після збою. Це можна зробити за допомогою систем обходу відмов, резервного копіювання джерел синхронізації та інших методів.

- **Масштабованість:** Масштабованість є необхідністю для систем синхронізації, оскільки сенсорні мережі можуть мати багато вузлів. Незалежно від розміру мережі або кількості вузлів, алгоритми синхронізації повинні бути ефективними та дієвими. Здатність систем синхронізації пристосовуватися до змін у мережі, таких як приєднання нових вузлів або видалення старих, також має вирішальне значення.

- **Надійність:** Через несприятливе середовище, в якому вони розгорнуті, мережеві вузли схильні до відключення або виходу з ладу. Будь-який план синхронізації повинен мати можливість пристосовуватися до цих мережевих змін і працювати за будь-яких обставин.

- **Довговічність:** Залежно від програми, синхронізація часу повинна тривати або до тих пір, поки мережа працює, або миттєво, наприклад, коли відбувається певна подія.

- **Вартість:** Вузли мережі стають все більш компактними та доступними завдяки передовим технологіям. Будь-який алгоритм синхронізації не повинен робити вузол мережі дорожчим або більшим.
- **Сфера застосування:** Алгоритм синхронізації часу або пропонує спільний час для всіх вузлів мережі, що вимагає більше часу та енергії, або робить це лише для фізично закритих вузлів.
- **Затримка:** Швидка реакція необхідна для кількох застосувань, зокрема для виявлення витоків газу. Загальний час, необхідний для синхронізації мережі для цих додатків, має бути якомога меншим.

Висновки

Отже, особливості синхронізації в мобільних сенсорних мережах (МСМ) відіграють важливу роль у забезпеченні ефективної та надійної роботи мережі. У цьому розділі ми розглянули різні аспекти, пов'язані з синхронізацією в МСМ, включаючи топологію сенсорних мереж, самокеровані надійні мережеві технології, технології IP-з'єднань, технології саморегульованого управління потоком, групування даних, синхронізацію вузлів, джерела помилок часової синхронізації та вимоги до схем синхронізації.

Топологія сенсорних мереж має значний вплив на синхронізацію, а такі міркування, як розмір мережі, щільність і схеми розгортання впливають на вибір і ефективність методів синхронізації. Самокеровані надійні мережеві технології в поєднанні з синхронізацією сприяють підвищенню загальної надійності та відмовостійкості WSN, забезпечуючи автономну роботу і стійкість до відмов вузлів.

Технології дешевих IP-з'єднань необхідні для безперешкодної інтеграції мереж WSN з існуючими IP-мережами, що дозволяє ефективно маршрутизувати дані і керувати ними. Крім того, технологія саморегульованого управління потоком забезпечує оптимальну швидкість передачі даних, зменшуючи перевантаження і максимізуючи ефективність мережі.

Методи групування даних у поєднанні з синхронізацією уможливають

ефективне злиття даних, агрегацію та спільну обробку сигналів у мережах WSN, підвищуючи точність і надійність зібраних даних.

Синхронізація вузлів є фундаментальним аспектом WSN, забезпечуючи загальне поняття часу і полегшуючи скоординовану діяльність. Різні методи синхронізації, такі як протоколи на основі затоплення, протоколи, що ініціюються приймачем, і методи на основі TDOA, пропонують різні підходи до досягнення синхронізації, враховуючи такі фактори, як точність, енергоефективність, масштабованість і стійкість до збоїв вузлів.

Однак, джерела помилок синхронізації часу, включаючи час надсилання, час доступу, час поширення та час отримання, створюють проблеми, які необхідно вирішувати в схемах синхронізації. Надійні алгоритми синхронізації та механізми самовідновлення необхідні для обробки цих помилок і забезпечення надійної синхронізації в мережах WSN.

Вимоги до схем синхронізації у WSN включають точність, стабільність, енергоефективність, масштабованість і відмовостійкість. Схеми синхронізації повинні забезпечувати точне вирівнювання часу, підтримувати стабільність у часі, заощаджувати енергію за рахунок планування сплячого режиму і циклічності роботи, ефективно масштабуватися у великих мережах і витримувати відмови вузлів без шкоди для синхронізації.

Розуміння особливостей синхронізації в бездротових сенсорних мережах має вирішальне значення для проектування ефективних і надійних MCM. Вирішуючи проблеми і вимоги синхронізації, дослідники і практики можуть розширити можливості WSN, що призведе до підвищення продуктивності мережі і уможливить широкий спектр застосувань у різних галузях.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Методи синхронізації для у мобільних сенсорних мережах

Мобільні сенсорні мережі (МСМ) набувають все більшого значення в широкому спектрі застосувань, від моніторингу навколишнього середовища і промислового контролю до охорони здоров'я і "розумних" будинків. Ці мережі складаються з великої кількості невеликих, малопотужних і недорогих пристроїв, що називаються вузлами, які можуть обмінюватися даними по бездротовому зв'язку один з одним. Синхронізація є ключовим аспектом WSN, оскільки вона гарантує, що вузли працюють скоординовано, що є необхідним для надійного та ефективного збору, обробки та передачі даних.

Для бездротових мереж існує три різні категорії методів синхронізації. Перша - найпростіша - це відносний час. Він залежить від того, як представлені події та повідомлення. Основна мета полягає в тому, щоб мати можливість встановити, чи подія 1 відбулася раніше за подію 2. Все, що потрібно для встановлення порядку - це порівняння локальних годинників. Синхронізація годинників не має вирішального значення.

Наступний підхід використовує відносний час, де вузли відстежують дрейф і зміщення, а мережеві годинники не залежать один від одного. Вузол зазвичай відстежує свій дрейф і зміщення відповідно до вузлів навколо нього. У будь-який час, використовуючи свій локальний час, вузли мають можливість синхронізуватися з іншими вузлами. Цей підхід використовується більшістю протоколів синхронізації.

Останній метод - глобальна синхронізація, при якій мережа підтримує постійну глобальну шкалу часу. Очевидно, що це найскладніший і найскладніший для реалізації спосіб синхронізації. Оскільки така синхронізація зазвичай не потрібна, дуже мало алгоритмів синхронізації використовують цей метод.

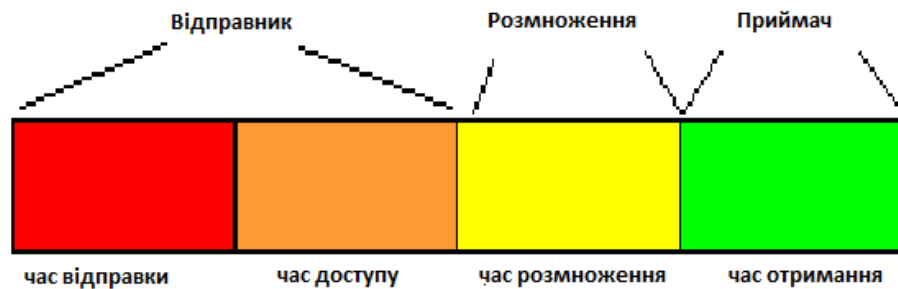


Рис 3.1. Розбивка компонентів затримки пакетів

Час відправлення, час доступу, час поширення і час прийому - це чотири основні елементи затримки пакетів, які застосовуються до всіх бездротових систем синхронізації, як показано на рисунку 3.1. Час, коли відправник створює повідомлення про час, яке буде надіслано мережею, називається часом відправлення. Час доступу на рівні MAC - це час, необхідний для підключення до мережі. У системі TDMA він може затримуватися до моменту передачі.

Час поширення - це час, необхідний для фізичного переміщення бітів через середовище. Вузол-одержувач, який обробляє і надсилає повідомлення хосту, називається вузлом прийому. Фундаментальною проблемою синхронізації часу є те, що може бути складно передбачити, скільки часу буде витрачено на кожну з них на додаток до затримки пакетів. Усунення однієї з них значно покращить продуктивність методу синхронізації.

Як було продемонстровано, існує безліч можливостей для синхронізації бездротових мереж або часу. Вони варіюються від надзвичайно складних і складних у застосуванні до простих і зрозумілих. Час відправлення, час доступу, час поширення і час прийому - це чотири основні компоненти всіх методів синхронізації, незалежно від обраної схеми.

Існує безліч методів синхронізації, більшість з яких мають мінімальні відмінності. Як і в будь-якому протоколі, фундаментальна концепція завжди присутня, але слабкі місця постійно виправляються.

Існує декілька протоколів, доступних для мереж WSN, кожен з яких має

свої переваги та недоліки. У цьому розділі ми обговоримо деякі з найпоширеніших та їх придатність для різних додатків WSN.

Множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA)

TDMA - це метод синхронізації, який призначає кожному вузлу певний часовий інтервал, протягом якого він може передавати або приймати дані. Мережа працює синхронізовано, кожен вузол слідує заздалегідь визначеному графіку. TDMA - це простий і ефективний метод синхронізації, який може бути реалізований за допомогою малопотужних пристроїв, що робить його добре придатним для додатків з великою кількістю вузлів. Однак TDMA вимагає централізованого контролера для управління розкладом, що може бути вузьким місцем у великих мережах. Крім того, TDMA може не підходити для додатків, які вимагають динамічного або гнучкого планування.

Множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA)

FDMA - це метод синхронізації, який призначає кожному вузлу певну смугу частот, в межах якої він може передавати або приймати дані. Мережа працює синхронізовано, кожен вузол дотримується заздалегідь визначеного частотного плану. FDMA також є простим і ефективним методом синхронізації, який може бути реалізований за допомогою малопотужних пристроїв. Однак, як і TDMA, FDMA вимагає централізованого контролера для управління розподілом частот, що може бути вузьким місцем у великих мережах. Крім того, FDMA може не підходити для додатків з великою кількістю вузлів, оскільки це може призвести до перешкод і зниження пропускну здатності мережі.

Множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA)

CDMA - це метод синхронізації, при якому кожному вузлу присвоюється унікальний код, який використовується для модуляції передачі даних. Мережа працює синхронізовано, кожен вузол використовує свій унікальний код для передачі та прийому даних. CDMA - це надійний метод синхронізації, який може підтримувати велику кількість вузлів і є стійким до перешкод. Однак CDMA вимагає більш складного апаратного забезпечення та алгоритмів

обробки сигналів, ніж TDMA і FDMA, що може збільшити вартість і енергоспоживання вузлів.

Синхронізація таймінгів для сенсорних мереж (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN).

Синхронізація таймінгів для сенсорних мереж (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN) є протоколом, розробленим для забезпечення точної синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах. Він має на меті координувати та узгоджувати внутрішні годинники сенсорних вузлів, що дозволяє їм спільно працювати та виконувати завдання, які потребують взаємодії та синхронізації.

Еталонна широкомова синхронізація (RBS)

RBS - це метод синхронізації, який використовує опорний вузол для синхронізації годинників усіх інших вузлів мережі. Еталонний вузол періодично транслює еталонний сигнал, і кожен вузол підлаштовує свій тактовий генератор відповідно до еталонного сигналу. RBS - це простий і ефективний метод синхронізації, який може бути реалізований у розподілений спосіб[24]. Однак, RBS вимагає стабільного еталонного вузла з надійним годинником, що може обмежити його застосування в деяких додатках.

Протокол синхронізації часу заповнення (Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP)

FTSP - це метод синхронізації, який використовує механізм переповнення для синхронізації годинників усіх вузлів мережі. Кожен вузол періодично транслює свій локальний час, а інші вузли підлаштовують свій годинник під найпершу отриману мітку часу[30]. FTSP - це розподілений метод синхронізації, який не потребує централізованого контролера або еталонного вузла.

3.1.1 Множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA)

Поділяючи час на інтервали, що не перекриваються, множинний доступ з часовим поділом каналів (TDMA), технологія бездротового зв'язку, забезпечує

ефективне використання радіочастотного спектру. Ця технологія була створена для використання в системах зв'язку, коли важливо передавати дані одночасно на декількох каналах.

Системи мобільного зв'язку вперше використали TDMA в 1970-х роках для покращення передачі голосу та даних. Він набув популярності завдяки своїм перевагам над конкуруючими технологіями доступу, такими як множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA) і множинний доступ з кодовим розділенням каналів (CDMA).

Часовий інтервал розбивається на одиниці, які називаються кадрами, а кожен кадр розбивається на ряд ідентичних часових фрагментів, які називаються слотами. Кожен користувач або канал має виділений слот у кожному кадрі для передачі даних. Це означає, що різні користувачі можуть передавати дані одночасно, але в різні часові інтервали.

Система TDMA передає цифрові сигнали, які сегментовані на встановлені часові проміжки. Кожному користувачеві надається виділений часовий інтервал для передачі даних. Сигнали передачі та прийому можуть бути синхронізовані таким чином, щоб приймачі могли відновити оригінальний сигнал і розрізнити дані від різних користувачів.

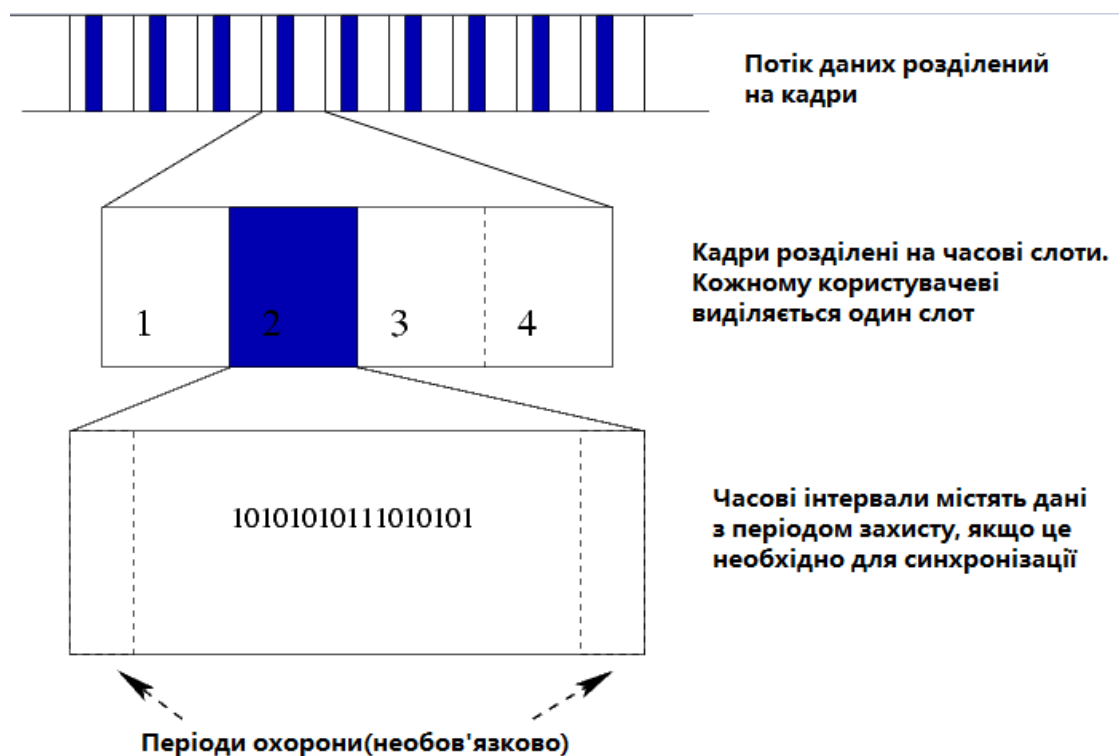


Рис.3.1 Структура кадру TDMA, яка показує потік даних, розділений на кадри, а ці кадри розділені на часові інтервали

Ефективне використання спектральних ресурсів є однією з переваг TDMA, яка дозволяє декільком користувачам використовувати одну і ту ж радіочастоту в різний час. Таким чином, пропускна здатність системи може бути збільшена, в той час як користувацькі перешкоди зменшуються.

Передача мови і даних використовує TDMA в сучасних системах мобільного зв'язку, таких як GSM (Глобальна система мобільного зв'язку). Крім того, існує ряд варіацій TDMA, в тому числі TDMA/FDD (Frequency Division Duplexing), в яких передача і прийом відбуваються на різних частотах для запобігання інтерференції.

3.1.2 Множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA)

Технологія бездротового зв'язку під назвою множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA) розділяє частотний спектр на кілька піддіапазонів для передачі даних. Тут ми розглянемо технічні особливості,

історичні передумови та основні ідеї FDMA.

Однією з перших технологій множинного доступу, яка була застосована в мережах мобільного зв'язку, була FDMA. Удосконалена система мобільного зв'язку (AMPS), яка дебютувала в США в 1983 році, була місцем, де вона була вперше застосована. Глобальна система мобільного зв'язку (GSM) та інші цифрові стандарти мобільного зв'язку пізніше використовували FDMA як важливий компонент.

У системі FDMA частотний спектр розділений на піддіапазони, що не перекриваються, які називаються каналами. Кожен користувач має унікальний канал, через який він може надсилати дані. Щоб відокремити різних користувачів і запобігти їхнім взаємним перешкодам, використовуються частотні канали.

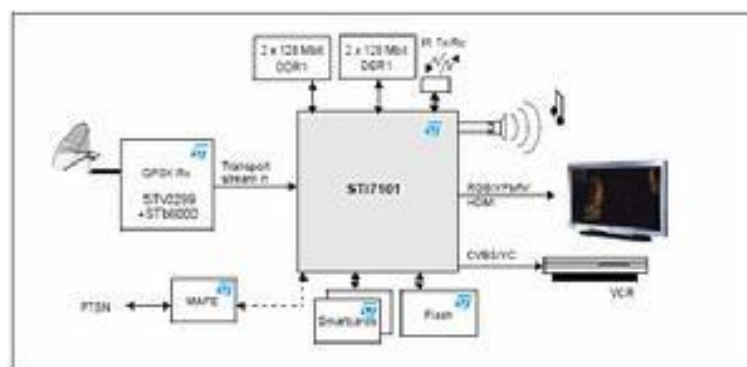


Рис.3.2 Принцип системи FDMA

Для перетворення цифрових даних в аналоговий сигнал, який можна передавати по радіоканалу, в системі FDMA використовується модуляція сигналу. Кожному користувачеві надається власна унікальна частота передачі, яку він може вільно використовувати протягом усього часу передачі даних. Потім приймачі використовують фільтри, щоб відокремити і вловити сигнали на відповідних частотних каналах.

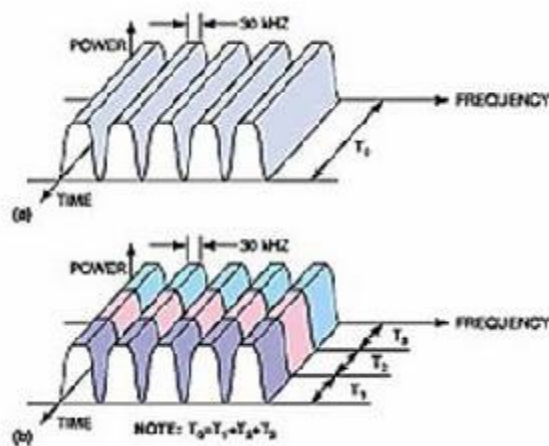


Рис.3.3 Діаграма поширення сигналу FDMA

Оскільки різні користувачі використовують різні частоти для передачі своїх даних, однією з переваг FDMA є те, що вона несприйнятлива до шуму і перешкод. Крім того, оскільки кілька користувачів можуть використовувати одну і ту ж радіочастоту в різний час, FDMA дозволяє ефективно використовувати частотний спектр.

3.1.3 Множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA)

Система бездротового зв'язку під назвою "множинний доступ з кодовим поділом каналів" (CDMA) використовує алгоритми кодування для передачі сигналів від різних користувачів по одному каналу. Зараз ми розглянемо технічні особливості, історичні передумови та фундаментальні ідеї CDMA.

Технологія CDMA була створена у 1940-х роках у США в рамках військових досліджень, спрямованих на підвищення надійності та стійкості зв'язку. Технологія розвивалася протягом наступних десятиліть, але значний прогрес відбувся в 1990-х роках, коли CDMA стала основою для цифрових стандартів мобільного зв'язку, включаючи IS-95 (Interim Standard-95) і CDMA2000.

Кожен користувач всистемі CDMA має спеціальний код, який він використовує для модуляції свого сигналу. Цей алгоритм розділяє сигнали кількох користувачів таким чином, що вони можуть одночасно передавати дані

по одному каналу. Використовуючи правильне кодування, приймачі здатні розрізняти та ідентифікувати сигнали від різних користувачів.

За допомогою технології розширення спектра, яку використовує система CDMA, сигнал передачі розсіюється по широкому частотному спектру за допомогою коду, який розділяє його на різні частотні піддіапазони. Кожен користувач має спеціальний код, який дозволяє відрізнити його сигнал від фоновому шуму та інших сигналів. В результаті численні користувачі можуть надсилати дані одночасно на одній і тій самій частоті.

Множинний доступ з розширеним спектром відомий як CDMA. При однаковій потужності, що передається, підхід з розширенням спектру рівномірно розподіляє смугу пропускання даних. Навідміну від інших вузькоімпульсних кодів, розширений код має вузьку функцію неоднозначності. Локально вироблений код в CDMA працює зі значно більшою швидкістю, ніж дані, що передаються. Більш швидкий код використовується для об'єднання даних, що передаються, за допомогою побітового XOR (виключає АБО). Генерація сигналу з розширеним спектром зображена нарисунку 3.5.

Сигнал даних з тривалістю імпульсу T_b (період символу) виконується XOR з кодовим сигналом тривалістю імпульсу T_c (період мікросхеми). Отже, пропускна здатність сигналу даних становить $1/T_b$, а ширина смуги сигналу з розширеним спектром становить $1/T_c$. Оскільки T_c набагато менше ніж T_b , ширина смуги сигналу з розширеним спектром набагато більша за смугу вихідного сигналу. Співвідношення T_b/T_c називається коефіцієнтом розповсюдження або вирашем обробки і визначає певною мірою верхню межу загальної кількості користувачів, які одночасно підтримуються базовою станцією.

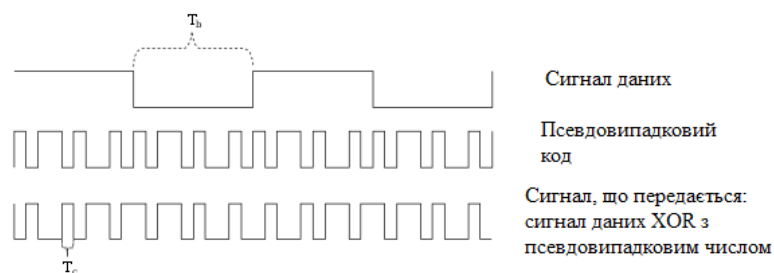


Рис.3.4 Генерація сигналу CDMA

У системі CDMA кожен користувач модулює свій сигнал за допомогою унікального коду. Робота систем CDMA значною мірою залежить від вибору кодів, що використовуються для модуляції сигналу. Коли існує чітке розмежування між сигналом цільового користувача і сигналами інших користувачів, продуктивність досягає найвищого рівня. Порівнюючи вхідний сигнал з локально створеним кодом цільового користувача, досягається розділення сигналів. Кореляційна функція є високою, і система може відокремити сигнал, якщо він відповідає коду цільового користувача. Кореляція повинна бути якомога ближчою до нуля (тим самим видаляючи сигнал), якщо потрібний код користувача не має нічого спільного з сигналом. Це називається перехресною кореляцією. Кореляція повинна бути якомога ближчою до нуля, якщо код і сигнал корелюють у будь-який період, відмінний від нуля. Автокореляція - це метод, який використовується для усунення багатопроменевих завад.

Сильна стійкість CDMA до шуму і перешкод є однією з його переваг. Сигнали можуть бути ідентифіковані навіть в умовах шуму і перешкод завдяки використанню спеціальних кодів для кожного користувача. Крім того, CDMA дозволяє ефективно використовувати спектр, оскільки кілька користувачів можуть одночасно використовувати одну і ту ж частоту.

3.1.4 Синхронізація таймінгів для сенсорних мереж (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN).

У бездротових сенсорних мережах, де багато розподілених вузлів повинні

співпрацювати та надсилати дані, синхронізація часу має вирішальне значення. У минулому існували різні методи синхронізації часу для бездротових мереж, але багато з них були неефективними або не враховували особливості сенсорних мереж.

Філіп Левіс та Девід Каллер з Університету Берклі вперше представили TPSN у 2003 році. Вони створили цей протокол, щоб гарантувати точну синхронізацію часу в бездротових сенсорних мережах з обмеженими ресурсами. Основою для TPSN послужив ZigBee, один з найпоширеніших стандартів для бездротових сенсорних мереж.

Фундаментальна ідея TPSN полягає в синхронізації та узгодженні внутрішніх годинників сенсорних вузлів по всій бездротовій мережі. Це досягається шляхом визначення місцезнаходження джерел синхронізації, використання ефективних методів передачі, корекції дрейфу тактового генератора і споживання якомога меншої кількості енергії.

Для багатьох застосувань в сенсорних мережах, включаючи координацію вузлів, збір даних, виявлення подій і багато іншого, TPSN пропонує точну синхронізацію часу. Цей протокол все ще залишається актуальним для досліджень в цій галузі і послужив основою для багатьох інших алгоритмів часової синхронізації в бездротових сенсорних мережах.

Фаза знаходження рівня та фаза синхронізації складають цей підхід до синхронізації. Кожному вузлу присвоюється рівень під час фази виявлення; кореневий вузол є єдиним вузлом, який отримує рівень 0. До кінця другої фази відбувається синхронізація всієї мережі між вузлом з рівнем n і вузлом з рівнем $n-1$. [16]

Фаза виявлення рівня: Першим кроком на цьому рівні має бути обрано кореневий вузол. Цей вузол може обиратися вузлами мережі на регулярній основі, і йому присвоюється рівень 0. Цей вузол може бути підключений до GPS або іншого зовнішнього джерела часу. Суміжні вузли, які отримують пакети виявлення рівня, що їх надсилає цей вузол, отримують рівень 1. Вузли продовжують надсилати пакети зі своїми номерами та ідентифікаторами, поки

вся мережа не отримає рівень.

Фаза синхронізації: Знову ж таки, кореневий вузол надсилає пакет `time_sync`, щоб розпочати фазу синхронізації. Використовуючи двосторонній зв'язок, вузол А на рівні n і вузол В на рівні $n-1$ синхронізуються. Пакет надсилається вузлом А разом з поточним локальним часом передачі T_1 . У момент часу T_2 , коли вузол В отримує пакет, можна обчислити наступне:

$$T_2 = T_1 + T_d + \Delta \quad (3.1)$$

Оскільки передбачається, що обидві величини залишаються незмінними протягом усього часу обміну повідомленнями, тому T_d являє собою затримку розповсюдження, а Δ - відносна зміщення синхронізації між вузлами. Зачекавши довільний проміжок часу, вузол В надсилає вузлу А пакет підтвердження в момент часу T_3 , який містить час T_1 , T_2 і T_3 , а також номер рівня вузла В. Вузол А може обчислити Δ і T_d наступним чином і синхронізуватися з вузлом В після того [6], як отримає це повідомлення в момент часу T_4 .

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (3.2)$$

$$T_d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} [22] \quad (3.3)$$

Коли всі вузли в мережі синхронізовані, цей процес синхронізації всіх вузлів рівня n з вузлами рівня $n-1$ продовжується.

Кореневий вузол знову починає процедуру синхронізації. Усім вузлам першого рівня надсилається пакет `time_sync`. Перед початком двостороннього обміну повідомленнями ці вузли зроблять паузу на непередбачуваний час. Вузли першого рівня синхронізують свої годинники з кореневими вузлами після того, як кореневий вузол надішле підтвердження.

Оскільки принаймні один вузол одного рівня є сусідом вузла другого рівня, вузол другого рівня зможе чути зв'язок між вузлами першого рівня. Вузли другого рівня чекатимуть випадковий проміжок часу після того, як почують цю передачу, перш ніж почати двосторонній обмін повідомленнями з вузлами першого рівня. Поки всі вузли не будуть синхронізовані з кореневим вузлом, ця процедура буде продовжуватися.

Знову ж таки, процедура синхронізації виконується так само, як і процедура пошуку рівня. Кореневий вузол транслює інформацію вузлам рівня 1, щоб ініціювати всі комунікації. Поки всі вузли на рівні $i-1$ не синхронізуються з вузлами на рівні i , цей зв'язок поширюється по всьому дереву. У цей момент всі вузли будуть синхронізовані з кореневим вузлом.

Час надсилання, час доступу, час поширення та час затримки прийому присутні у кожному пакеті синхронізації. Усунення будь-якої з них буде корисним. Хоча TPSN не усуває повністю невизначеність відправника, вона зменшує її. Крім того, оскільки TPSN є багатопроцесорним протоколом, дальність передачі не викликає занепокоєння.

На відміну від RBS, TPSN має невизначеність відправника. Вони намагаються зменшити цю недетермінованість за допомогою маркування часу пакетів на рівні MAC. Стверджується, що невизначеність відправника ледве реєструється в загальній помилці синхронізації. Стверджується, що TPSN має точність в два рази кращу, ніж RBS, і що синхронізація "відправник-одержувач" є кращою, ніж синхронізація "одержувач-одержувач", оскільки зменшує невизначеність за рахунок короткого часу штампування. Дальність передачі також накладає обмеження на RBS. Було зазначено, що якщо діапазон передачі відносно обмежений, то RBS може не враховувати час поширення. Це не так, якщо мережа має багато переходів. Для синхронізації вузла RBS потрібно було б випромінювати більше опорних маяків. На противагу цьому, TPSN була створена для мереж з багатьма вузлами. Для того, щоб точно поширювати інформацію про час по всій мережі, в їхньому підході використовується техніка на основі дерев.

Стверджується, що техніка синхронізації від відправника до одержувача є більш точною, ніж синхронізація від одержувача до одержувача. RBS добре працює в однохапових мережах, а TPSN створена для багатобапових мереж.

Як наслідок, дальність передачі не має значення для TPSN. TPSN має вищі накладні витрати, ніж RBS, з точки зору енергії. Пакети, що доставляються для виявлення рівня i вибору кореневого вузла, вважаються

накладними витратами. Таке навантаження скорочує термін служби мережі, особливо якщо кореневі вузли часто виходять з ладу і процес синхронізації доводиться повторювати.

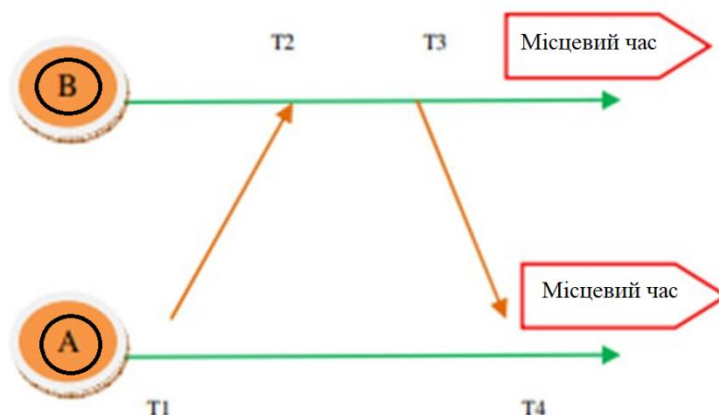


Рис. 3.5 Двосторонній обмін повідомленнями

Двосторонній обмін повідомленнями між двома вузлами показано на рисунку 3.6. Використовуючи цю техніку, це повідомлення може синхронізувати два вузли. Відповідні виміряні моменти часу T_1 , T_2 , T_3 і T_4 . У момент часу T_1 вузол А передасть пакет синхронізації імпульсу вузлу В. У цьому пакеті міститься рівень вузла А і час T_1 , в який його було надіслано. Пакет досягне вузла В у момент часу T_2 . Пакет підтвердження, який вузол В надсилає вузлу А, надсилається у момент часу T_3 . Цей пакет містить номер рівня вузла В, а також час T_1 , T_2 і T_3 . Знання дрейфу дозволяє вузлу А налаштувати свій годинник і успішно синхронізуватися з вузлом В. Саме так відбувається обмін даними в TPSN.

Оскільки принаймні один вузол одного рівня є сусідом вузла другого рівня, вузол другого рівня зможе чути зв'язок між вузлами першого рівня. Вузли другого рівня чекатимуть випадковий проміжок часу після того, як почують цю передачу, перш ніж розпочати двосторонній обмін повідомленнями з вузлами першого рівня. Поки всі вузли не будуть синхронізовані з кореневим вузлом, ця процедура буде продовжуватися. Знову

ж таки, процедура синхронізації виконується так само, як і процедура пошуку рівня. Кореневий вузол транслює інформацію вузлам рівня 1, щоб ініціювати всі комунікації. Поки всі вузли на рівні $i-1$ не синхронізуються з вузлами на рівні i , цей зв'язок поширюється по всьому дереву. До цього часу всі вузли синхронізуються з кореневим вузлом.

3.1.5 Еталонна широкомовна синхронізація (RBS)

Концепція широкомовної еталонної синхронізації (RBS) полягає у надсиланні еталонного сигналу з одного джерела до кожного приймача в мережі, який має точний часовий маркер. Локальні годинники пристроїв синхронізуються за допомогою цього еталонного сигналу, щоб переконатися, що всі вони працюють одночасно.

Основна мета цього алгоритму - усунути недетермінований час надсилання. Недетерміновані затримки поширення і прийому є єдиними джерелами помилок у цьому підході. Припущення, що радіус дії радіосигналу обмежений і що маяк передає сигнал на всі вузли одночасно, дозволяє нам ігнорувати помилки, спричинені затримкою розповсюдження. Таким чином, єдиним джерелом неточності в цій системі є час прийому. Особливістю RBS є те, що вона синхронізує приймач за допомогою приймача. План полягає в тому, що третя сторона надсилає маячок на обидва приймачі (A і B) одночасно. Приймачі порівнюють свої годинники (t_a і t_b) один з одним, щоб визначити їх відносні фазові зсуви, оскільки маяк не надає ніякої інформації про час. Коли вузол отримує опорний маяк, він визначає час[24].

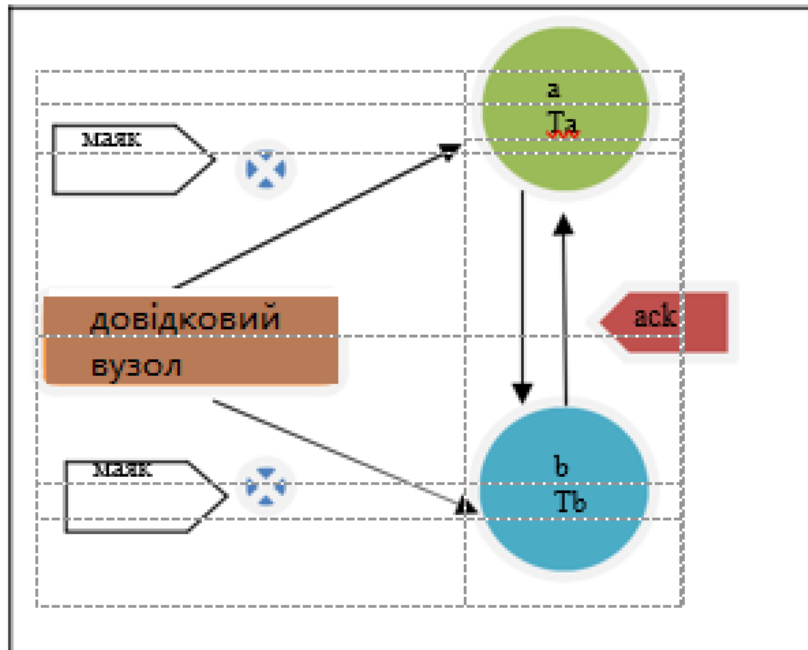


Рис.3.6 Схема синхронізації Reference Broadcast Synchronization(RBS)

Найпоширеніший вид зв'язку полягає в тому, що вузол надсилає маячок своїм сусідам, які потім обмінюються часом отримання маячка, щоб визначити свої часові зсуви і синхронізуватися. Кількість маяків синхронізації, що використовуються в цій техніці, підвищує точність методу.

За допомогою цієї техніки можна досягти точності в декілька мкс. На вершині Берклі, яка є популярною платформою, була досягнута точність 11 мкс. Крім того, цей алгоритм був застосований до машин Linux, що здійснюють зв'язок за протоколом 802.11, і була досягнута точність $6,29 \pm 6,45$ мкс

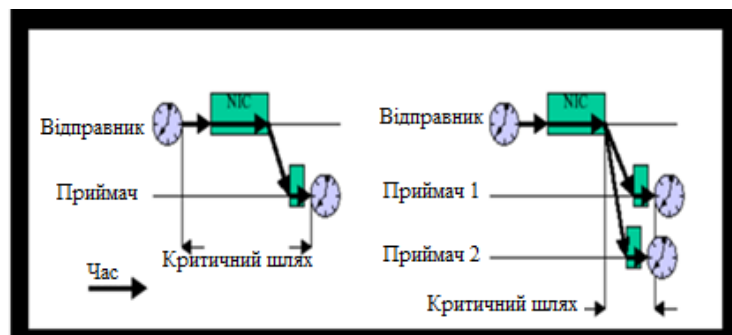


Рис.3.7 Аналіз критичного шляху для традиційних протоколів синхронізації часу (ліворуч) та RBS (праворуч).

Точна позначка часу надсилається кожному приймачу в мережі системою RBS з використанням одного або декількох еталонних джерел. Цей сигнал може надсилатися через точки доступу до мережі або в режимі широкомовлення. Опорний сигнал приймається приймачами, які потім використовують його для синхронізації своїх локальних годинників до одного часового поясу.

Точна синхронізація часу в бездротових мережах можлива завдяки широкомовній еталонній синхронізації (RBS). Вона використовується в широкому спектрі застосувань, включаючи бездротові сенсорні мережі, мережі Інтернету речей (IoT), мобільний зв'язок і багато інших.

3.1.6 Протокол синхронізації часу заповнення (Flooding Time Synchronization, FTSP)

Унікальний протокол синхронізації часу для мереж WSN називається протоколом прямої синхронізації часу (FTSP)[30]. Він повністю усуває час доступу до радіоканалу, необхідний в протоколах CSMA/MAC, і досягає відмінної точності, використовуючи часові мітки радіоповідомлень на найнижчих рівнях радіостеку. Завдяки використанню лінійної регресії для корекції перекосів тактової частоти вузлів, що беруть участь, точність підвищується. Ряд процесів, особливо регулярний розподіл повідомлень синхронізації по всій мережі, використовуються для забезпечення надійності проти відмов вузлів і з'єднань. FTSP використовує односторонній трафік для синхронізації, щоб використовувати порівняно скромну пропускну здатність мережі. Протокол внутрішньомережевої синхронізації часу, відомий як FTSP, обирається як кореневий вузол, який відповідає за розповсюдження поточного глобального часу.

Щоб гарантувати синхронізацію часу між вузлами датчиків, FTSP використовує переповнення повідомлень. Основні технічні характеристики протоколу FTSP[30] включають наступне:

1. *Синхронізація з точною шкалою*: Глобальна система часу, яку

використовує FTSP, базується на сигналах заповнення та локальних годинниках вузлів. Це дозволяє синхронізувати час у мережі з високим ступенем точності.

2. *Використання сигналів заповнення:* У мережі вузли FTSP передають сигнали заповнення з даними про свій локальний час і затримку передачі. Ці сигнали приймаються іншими вузлами, які потім використовують їх для синхронізації свого локального часу.

3. *Компенсація затримок передачі:* Для підвищення точності синхронізації часу FTSP застосовує компенсацію, враховуючи затримки передачі сигналів заповнення. Для розрахунку затримки та коригування локального часу вузлів враховується інтервал між моментом передачі сигналу та моментом його отримання.

4. *Енергоефективність:* Протокол FTSP оптимізовано для зменшення споживання енергії. При обмеженій кількості енергії він використовує ефективні алгоритми передачі та прийому сигналів заповнення для забезпечення точної часової синхронізації.

FTSP має низку переваг над TPSN, які вона вдосконалила. Хоча TPSN пропонував протокол для багатовузлової мережі, йому було важко адаптуватися до змін у топології. Якщо кореневий вузол або топологія змінювалися, TPSN повинен був перезапустити крок виявлення рівня. Це призведе до збільшення мережевого трафіку і накладних витрат.

Для того, щоб впоратися з відмовами каналів і вузлів, FTSP використовує переповнення повідомлень синхронізації, що робить його надійним. Крім того, переповнення дозволяє динамічні топологічні модифікації. Динамічна топологія необхідна, оскільки протокол передбачає, що кореневий вузол повинен періодично переобиратися. Подібно до TPSN, FTSP пропонує мітку часу на рівні MAC, що значно підвищує точність і зменшує джиттер. Всі помилки будуть видалені, за винятком часу розповсюдження. Для обчислення дрейфу і зсуву синхронізації він поєднує лінійну регресію і повторні часові мітки.

Основні переваги FTSP включають гнучкість у динамічній зміні

топології, стійкість до відмов вузлів і з'єднань, а також точне відмічання часу на рівні МАС. Для полегшення мережевої синхронізації, коли всі вузли синхронізуються з кореневим вузлом, він пропонує протокол низькошвидкісного переповнення.

3.3 Tiny-Sync та Mini-Sync

Tiny-Sync - це механізм синхронізації, створений для бездротових сенсорних мереж з обмеженими ресурсами. Його основна мета - забезпечити точну синхронізацію вузлів мережі. Щоб гарантувати синхронізацію мережевого часу, протокол Tiny-Sync використовує механізми моніторингу подій та обміну повідомленнями[34].

Протокол Tiny-Sync використовує події для синхронізації, що є однією з його основних особливостей. Кожен вузол мережі обчислює час, що минув, на основі подій, які він отримує з мережі, і ділиться цією інформацією з іншими вузлами. Tiny-Sync досягає мілісекундної точності синхронізації, використовуючи методи розповсюдження та вирішення колізій.

Інший протокол синхронізації для бездротових сенсорних мереж називається Mini-Sync. Він також намагається використовувати розріджені ресурси для забезпечення точної синхронізації між вузлами мережі. Однак Mini-Sync робить це, використовуючи кілька ідей та методів[34].

Фундаментальний принцип протоколу Mini-Sync полягає у синхронізації інших вузлів за допомогою глобальної орієнтації та унікальних сигналів, що передаються відомим вузлом. Локальні годинники вузлів коригуються в результаті відстеження цих сигналів. Низька пропускну здатність і мікросекундна точність синхронізації забезпечується за допомогою Mini-Sync.

У цій роботі запропоновано два простих методи синхронізації для пари бездротових вузлів. Потім до цих методів додається можливість синхронізації цілих вузлів мережі. Точки даних збираються за допомогою звичайного двостороннього обміну повідомленнями, а потім використовуються для встановлення жорстких обмежень на відносний дрейф і відносне зміщення між

двома вузлами. Вузол 1 надсилає повідомлення про зондування з позначкою часу t_o на вузол 2, створюючи точку даних з використанням двох вузлів (1 і 2). Вузол 2 відповідає на повідомлення з t_b і надсилає підтвердження вузлу 1, який відповідає на підтвердження з t_r або відразу, або пізніше. На рисунку 3.8 зображено описану послідовність.[16]

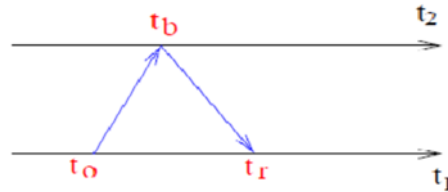


Рис.3.8 Обмін зондуючими повідомленнями.

Наступні співвідношення повинні існувати відповідно до рівняння з урахуванням порядку передачі даних:

$$t_o(t) < a_{12}t_b(t) + b_{12} \quad (3.4)$$

$$t_r > a_{12}t_b(t) + b_{12} \quad (3.5)$$

Щоб оцінити a_{12} і b_{12} та синхронізувати вузли між собою, алгоритми починають збирати точки даних. Хоча точки даних можна збирати за допомогою мережевих підтверджень та звичайних пакетів даних, що зменшує накладні витрати, обчислення a_{12} та b_{12} потребує значної обробки та зберігання.

3.4 Алгоритми синхронізації на основі дерева

У той час як деякі мобільні сенсорні мережі потребують мілісекундної точності, інші вимагають точності в мікросекундному діапазоні. Алгоритми враховують цей факт, припускаючи, що складність і час обчислень залежать від наданої точності, і навпаки.

Кістякове дерево (Рис.3.9) будується на першому етапі першого алгоритму, який складається з двох фаз. Друга фаза процесу включає синхронізацію відправника з одержувачем уздовж $n-1$ ребер остовного дерева. Всі вузли синхронізуються з вузлом-поглиначем або кореневим вузлом, який є

центральною вузлом у цьому централізованому процесі. Кожного разу, коли це необхідно, фаза синхронізації повинна починатися з кореневого вузла. Крім того, він встановлює загальний час синхронізації мережі.

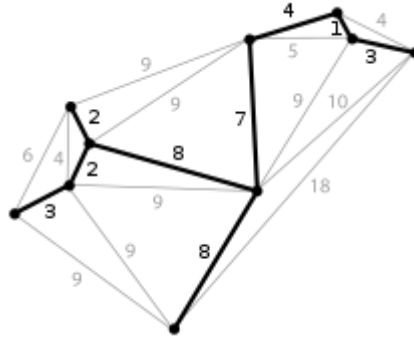


Рис.3.9 Побудова кістякового дерева

Кореневий вузол повинен періодично оновлювати глибину остовного дерева, щоб він міг виконувати ці обчислення і виносити додаткові судження.

У другому підході вузли вибирають, коли синхронізуватися, виходячи з необхідної точності, відстані від опорного вузла і дрейфу тактового генератора. Таким чином, фаза синхронізації з опорною точкою може бути розпочата будь-яким вузлом мережі, але спочатку він повинен синхронізуватися з усіма вузлами на шляху до цієї опорної точки. Такий підхід знімає тягар безглуздої синхронізації, дозволяючи вузлам приймати рішення, оскільки певні вузли не потребують постійної синхронізації. Цей метод покращується шляхом агрегування запитів на синхронізацію. Перед відправкою запиту на синхронізацію, вузол спочатку запитує своїх сусідів, чи є вже існуючі запити на синхронізацію. Якщо такі є, то вузол додає свій запит до списку очікуваних запитів, гарантуючи, що шлях потрібно синхронізувати лише один раз.

Запропонований у цій статті підхід створює піддерева з усієї мережі. У кожному піддереві дочірні вузли синхронізуються зі своїм батьківським або кореневим вузлом. Потім всі батьки синхронізуються один з одним.

З точки зору точності, ми виявили, що RBS і TPSN працюють неймовірно добре. Вони мають точність в декілька мікросекунд. Кількість пакетів,

необхідних для синхронізації пари вузлів, можна використовувати для оцінки енергоефективності, оскільки відправлення та отримання пакетів споживає найбільше енергії під час цього процесу.

RBS, алгоритм "приймач-приймач", синхронізує два вузли, надсилаючи та отримуючи 4 та 3 пакети відповідно. Для синхронізації двох вузлів в TPSN передається два пакети і приймається два пакети. Незважаючи на те, що визначення рівня в TPSN вимагає додаткових пакетів для передачі та прийому, і незважаючи на те, що в RBS більше одного приймача може синхронізуватися за один імпульс, TPSN виявляється менш енергоефективною[35]. Складність методів деревовидної синхронізації може бути як високою, так і низькою, залежно від бажаної точності. Ці методи значною мірою покладаються на кореневий вузол, який може бути з'єднаний із зовнішніми вузлами для отримання часу життя в реальному часі. визначення зсуву.Цього достатньо для збереження місцевого часового масштабу.

RBS можна розвивати від найпростішої конфігурації з однією трансляцією та двома приймачами до синхронізації між n приймачами, де $n > 2$. Для цього може знадобитися надсилання кількох повідомлень. Точність синхронізації зростатиме зі збільшенням кількості передач. RBS використовує синхронізацію між приймачами, що відрізняє її від звичайної синхронізації між відправниками. Всі вузли отримують опорний маяк, який передається в ефір. Вузли-одержувачі позначають свій місцевий час після отримання повідомлення, а потім обмінюються даними синхронізації з сусідніми вузлами. Після цього вузли можуть обчислити своє зміщення.

3.5 Споживання енергії схем синхронізації

Синхронізація є важливим аспектом мобільних сенсорних мереж (MCM), який забезпечує узгоджену роботу між вузлами, що є необхідним для надійного та ефективного збору, обробки та передачі даних. Однак синхронізація також споживає значну потужність, що може вплинути на загальну енергоефективність MCM[18]. Зараз ми розглянемо енергоспоживання різних

схем синхронізації та порівняємо їх за допомогою таблиць.

Множинний доступ з часовим поділом каналів (TDMA)

TDMA - це схема синхронізації, яка призначає кожному вузлу певний часовий інтервал, протягом якого він може передавати або приймати дані. TDMA вимагає централізованого контролера для управління розкладом, який може споживати енергію. Однак, вузли TDMA повинні бути активними лише протягом призначених їм часових інтервалів, що може зменшити загальне енергоспоживання. У таблиці 3.1 показано енергоспоживання TDMA з точки зору часу активності та часу простою вузлів.

Таблиця 3.1

Енергоспоживання TDMA з точки зору часу активності та часу простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
TDMA (активний час)	Низький
TDMA (час простою)	Дуже низький

Множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA)

FDMA - це схема синхронізації, яка призначає кожному вузлу певну смугу частот, в межах якої він може передавати або приймати дані. FDMA вимагає централізованого контролера для управління частотним розподілом, який може споживати енергію. Однак вузли FDMA повинні бути активними постійно, щоб контролювати призначені їм смуги частот, що може збільшити загальне енергоспоживання. У таблиці 3.2 показано енергоспоживання FDMA з точки зору часу активності та часу простою вузлів.

Таблиця 3.2

Енергоспоживання FDMA з точки зору часу активності та часу простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
FDMA (активний час)	Високий
FDMA (час простою)	Низький

Множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA)

CDMA - це схема синхронізації, яка присвоює кожному вузлу унікальний код, який використовується для модуляції передачі даних. CDMA вимагає більш складного апаратного забезпечення та алгоритмів обробки сигналів, ніж TDMA і FDMA, що може збільшити енергоспоживання вузлів. Однак CDMA може підтримувати кілька одночасних передач, що може збільшити пропускну здатність мережі і зменшити загальне енергоспоживання. У таблиці 3.3 показано енергоспоживання CDMA в перерахунку на активний час і час простою вузлів.

Таблиця 3.3

Енергоспоживання CDMA в перерахунку на активний час і час простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
CDMA (активний час)	Високий
CDMA (час простою)	Низький

Протокол синхронізації часу (TPSN)

TPSN – це схема синхронізації[15], яка використовує централізований сервер часу для синхронізації годинників усіх вузлів мережі. TPSN вимагає виділеного сервера часу, який може споживати енергію. Однак, вузли TPSN повинні бути активними лише під час процесу синхронізації часу, що може

зменшити загальне енергоспоживання. У таблиці 3.4 показано енергоспоживання TPSN з точки зору часу активності та часу простою вузлів.

Таблиця 3.4

Енергоспоживання TPSN з точки зору часу активності та часу простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
TPSN(активний час)	Низький
TPSN (час простою)	Дуже низький

Еталонна синхронізація мовлення (RBS)

RBS - це схема синхронізації, яка використовує опорний вузол для синхронізації годинників усіх інших вузлів мережі. Вузли RBS повинні безперервно прослуховувати трансляції опорного вузла, що може збільшити загальне енергоспоживання. У таблиці 3.5 показано енергоспоживання RBS в перерахунку на активний час та час простою вузлів.

Таблиця 3.5

Енергоспоживання RBS в перерахунку на активний час та час простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
RBS (активний час)	Високий
RBS (час простою)	Низький

Протокол синхронізації часу затоплення (FTSP)

FTSP - це схема синхронізації, яка схожа на TSP, але є розподіленою, тобто кожен вузол мережі робить свій внесок у процес синхронізації часу. Вузли FTSP повинні зв'язуватися один з одним для обміну інформацією про час, що може споживати енергію. У таблиці 3.6 показано енергоспоживання FTSP з точки зору активного часу та часу простою вузлів.

Таблиця 3.6

Енергоспоживання FTSP з точки зору активного часу та часу простою вузлів

Схема синхронізації	Енергоспоживання
FTSP (активний час)	Високий
FTSP (час простою)	Низький

Таким чином, енергоспоживання схем синхронізації залежить від декількох факторів, таких як топологія мережі, кількість вузлів, метод синхронізації, а також апаратне та програмне забезпечення вузлів. TDMA і TSP є найбільш енергоефективними схемами синхронізації[35], оскільки вони вимагають низького енергоспоживання під час простою вузлів. FDMA і CDMA вимагають високого енергоспоживання в активний час роботи вузлів, оскільки їм необхідно постійно контролювати і модулювати свої частотні діапазони або коди. RBS і FTSP вимагають високого енергоспоживання в активний час роботи вузлів, оскільки їм необхідно спілкуватися один з одним для обміну інформацією про час. У таблиці 3.7 наведено дані про енергоспоживання схем синхронізації, розглянутих у цій статті.

Таблиця 3.7

Енергоспоживання схем синхронізації

Схема синхронізації	Енергоспоживання (активний час)	Енергоспоживання (час простою)
TDMA	Низький	Дуже низький
FDMA	Високий	Низький
CDMA	Високий	Низький
TPSN	Низький	Дуже низький
RBS	Високий	Низький
FTSP	Високий	Низький

Важливо відзначити, що енергоспоживання схеми синхронізації - не єдиний фактор, який впливає на загальну енергоефективність мережі WSN. Інші фактори, такі як передача, обробка та зберігання даних, також впливають на енергоспоживання вузлів. Тому необхідно враховувати енергоспоживання всіх компонентів WSN і оптимізувати їх разом для досягнення найкращої енергоефективності.

Крім того, енергоспоживання схеми синхронізації також може змінюватися в залежності від деталей реалізації і конкретних вимог програми. Наприклад, в TDMA на енергоспоживання може впливати довжина часових інтервалів і кількість часових інтервалів, виділених для кожного вузла. Аналогічно, в TSP частота і тривалість пакетів синхронізації можуть впливати на енергоспоживання.

Нарешті, варто згадати, що останні дослідження зосереджені на розробці нових схем синхронізації, які можуть ще більше оптимізувати енергоефективність мереж WSN. Наприклад, деякі дослідження пропонують використовувати гібридні схеми синхронізації, які поєднують переваги TDMA і TPSN для досягнення як енергоефективності, так і точності синхронізації. В інших дослідженнях пропонується використовувати схеми на основі радіосигналу пробудження, які дозволяють вузлам синхронізуватися і обмінюватися даними тільки в разі необхідності, знижуючи загальне енергоспоживання мережі.

На закінчення, вибір правильної схеми синхронізації для WSN вимагає врахування компромісу між точністю синхронізації і енергоспоживанням. TDMA і TSP підходять для додатків, для яких пріоритетом є енергоефективність, в той час як FDMA і CDMA підходять для додатків, для яких пріоритетом є пропускна здатність мережі і завадостійкість. RBS і FTSP підходять для додатків, для яких пріоритетом є розподілена і відмовостійка синхронізація. Порівнюючи енергоспоживання різних схем синхронізації, розробники мереж WSN можуть приймати обґрунтовані рішення для оптимізації енергоефективності та продуктивності своїх мереж[35].

3.6 Оцінка алгоритмів синхронізації часу

Об'єднуючи дані з кожного датчика для отримання єдиного результату, створюється корисність або доступність сенсорної мережі для задоволення запитів користувачів. Для того, щоб виконати цю операцію, ці датчики повинні узгодити концепцію, наприклад, час. Шляхом синхронізації локальних годинниківна кожному активному датчику (учаснику) або шляхом трансляції штампу, всі активні датчики (учасники) можуть бути загорнуті в єдину часову шкалу. Нижче наведено порівняння різних методів синхронізації часу для WSN на основі таких важливих критеріїв, як точність, енергоефективність, мобільність і складність.

- Енергоефективність: У більшості мобільних мереж це неявний критерій, якому необхідно відповідати і який змінюється в залежності від попиту. Ця вимога, наприклад, сильно підштовхує вузли до того, щоб спати якомога частіше в сенсорних мережах, різко обмежуючи енергію, доступну для синхронізації та інших операцій. Розмір датчиків на батареях є основною причиною цього обмеження. Як наслідок, менше енергії генерується і зберігається.

- Точність - це вимір того, наскільки добре час, що зберігається в мережі, порівнюється з еталонним часом. Іншими словами, це вимірювання точності синхронізації. У випадку абсолютної точності, високоточний протокол забезпечує високу точність. Це означає, що час, синхронізований в мережі, відхиляється від зовнішнього еталонного часу лише незначно. (наприклад, UTC). У випадку відносної точності синхронізований набір вузлів розглядається як найбільше відхилення годинникового вузла, набір якого є відносно невеликим.

- Обчислювана складність: Бездротові мережі часто мають обмежені енергетичні ресурси та фізичні можливості. Тому, коли ми розрізняємо обчислювальну вартість протоколу (наприклад, вимоги до виконання і пам'яті) і складність повідомлень, протокол синхронізації може виявитися корисним протоколом для багатьох застосувань. (кількість повідомлень, якими

обмінюються під час синхронізації).

- Мобільні мережі: У мобільній мережі датчики можуть переміщатися і зв'язуватися з іншими датчиками лише тоді, коли вони перебувають у межах свого географічного діапазону. Діапазон зв'язку, який мобільний датчик може використовувати для успішного зв'язку та обміну повідомленнями з іншими датчиками, називається зоною дії. Змінити топологію може бути складно, оскільки це вимагає перерахунку околиць або кластерів і ресинхронізації вузлів.

Таблиця 3.8

Проблеми таксономії алгоритмів за синхронізацією

Алгоритми	Характеристики застосування			
	Енергоефективність	мобільність	складність	точність
RBS	Високий	Ні	Висока	Висока
TPSN	Високий	Ні	Низька	Висока
FTSP	Високий	Так	Висока	Висока
TDMA	Низький	Так	Висока	Висока
FDMA	Високий	Ні	Низька	Висока
CDMA	Низький	Так	Висока	Висока

3.7 Удосконалення алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах

Однією з ключових проблем у МСМ є досягнення точної та надійної синхронізації часу між сенсорними вузлами. Алгоритми синхронізації відіграють вирішальну роль у досягненні цієї мети. Нижче ми обговоримо деякі методи покращення алгоритмів синхронізації у МСМ.

Калібрування - це процес налаштування параметрів алгоритму синхронізації відповідно до характеристик апаратного забезпечення та середовища сенсорних вузлів. Калібрування може підвищити точність і стабільність алгоритмів синхронізації, зменшуючи вплив апаратних засобів і

варіацій навколишнього середовища. Наприклад, зміни температури можуть впливати на частоту кварцового генератора вузлів, що призводить до часових зсувів. Періодично калібруючи частоту генератора, алгоритм синхронізації може компенсувати ці дрейфи і підтримувати точну синхронізацію.

Алгоритми синхронізації можуть страждати від різних джерел помилок, таких як зсув тактової частоти, затримка розповсюдження та втрата пакетів. Методи виправлення помилок можуть підвищити точність і надійність алгоритмів синхронізації, зменшуючи вплив цих помилок. Наприклад, методи відмітки часу можуть зменшити похибку зсуву синхронізації за рахунок використання декількох еталонів часу для оцінки дрейфу синхронізації вузлів. Методи прямої корекції помилок (FEC) можуть зменшити вплив втрати пакетів, кодуючи пакети синхронізації надлишковими даними, що дозволяє приймачу відновити втрачені пакети.

Топологія мережі може впливати на точність синхронізації та ефективність МСМ. Щільні мережі з великою кількістю вузлів у безпосередній близькості можуть призвести до високого рівня завад і колізій, що може погіршити продуктивність синхронізації. Розріджені мережі з великими відстанями між вузлами можуть страждати від довгих затримок поширення, що може збільшити помилку синхронізації. Вибір відповідної топології мережі може покращити продуктивність синхронізації МСМ. Наприклад, ієрархічна топологія з кількома централізованими вузлами може зменшити рівень завад і колізій, в той час як комірчаста топологія з декількома шляхами між вузлами може зменшити затримки розповсюдження.

У деяких МСМ неможливо досягти прямого зв'язку між усіма парами вузлів через обмежений радіус дії вузлів. Алгоритми багатохопкової синхронізації можуть вирішити цю проблему, використовуючи проміжні вузли для ретрансляції пакетів синхронізації між віддаленими вузлами. Багатохопна синхронізація може покращити покриття та зв'язність МСМ, але вона також може вносити додаткові помилки та затримки через накладні витрати на передачу та обробку проміжних вузлів. Вдосконалення алгоритмів

маршрутизації та планування проміжних вузлів може покращити продуктивність синхронізації алгоритмів багатоголової синхронізації.

Гібридні алгоритми синхронізації можуть поєднувати декілька методів синхронізації для досягнення балансу між точністю та ефективністю. Наприклад, гібридний алгоритм синхронізації може використовувати TDMA для зменшення кількості колізій та завад, а також TSP для зменшення похибки дрейфу тактового генератора[36]. Гібридна синхронізація може використовувати сильні сторони різних методів синхронізації для досягнення кращої продуктивності, ніж кожний з них окремо. Однак алгоритми гібридної синхронізації можуть також створювати додаткову складність і накладні витрати, а їх розробка та оптимізація вимагають ретельного розгляду компромісів між точністю, ефективністю та складністю.

3.8 Оцінка запропонованих методів з точки зору продуктивності та ефективності

Запропоновані методи покращення алгоритмів синхронізації у WSN мають різний вплив на продуктивність та ефективність. У цій оцінці ми обговоримо вплив кожного методу на продуктивність та ефективність.

Калібрування

Калібрування може підвищити точність і стабільність алгоритмів синхронізації, зменшуючи вплив апаратних засобів і варіацій навколишнього середовища. Однак калібрування вимагає додаткових апаратних і програмних ресурсів, таких як калібрувальне обладнання, датчики та програмне забезпечення для калібрування. Тому калібрування може знизити продуктивність мереж WSN, збільшуючи вартість і складність розгортання і обслуговування. З іншого боку, калібрування може підвищити ефективність алгоритмів синхронізації за рахунок зменшення часу і енергії, необхідних для синхронізації, і підвищення загальної точності і надійності мережі.

Виправлення помилок

Методи корекції помилок можуть підвищити точність і надійність

алгоритмів синхронізації, пом'якшуючи ефекти зсуву синхронізації, затримки поширення і втрати пакетів. Однак корекція помилок вимагає додаткових витрат на обробку та передачу даних, таких як відмітка часу, кодування та декодування. Тому корекція помилок може знизити ефективність алгоритмів синхронізації, збільшуючи час і енергію, необхідні для синхронізації, а також підвищуючи складність і накладні витрати мережі. З іншого боку, корекція помилок може підвищити продуктивність мереж WSN за рахунок підвищення точності і надійності додатків зондування і управління, а також зменшення потреби в повторних передачах і обробці помилок.

Топологія мережі

Топологія мережі може впливати на точність синхронізації та ефективність роботи мереж WSN. Вибір відповідної топології мережі може покращити продуктивність синхронізації мереж WSN. Однак, зміна топології мережі вимагає реконфігурації мережі, що може знизити продуктивність мереж WSN через збільшення часу розгортання та обслуговування, а також складності. З іншого боку, оптимізація топології мережі може підвищити ефективність алгоритмів синхронізації за рахунок зменшення завад, колізій і затримок поширення, а також збільшення загальної зв'язності і покриття мережі.

Багатоступенева синхронізація

Алгоритми багатоступеневої синхронізації можуть покращити покриття та зв'язність мереж WSN. Однак, багатохорова синхронізація вимагає додаткових витрат на обробку і передачу даних, таких як маршрутизація, планування і переадресація. Тому багатохорова синхронізація може знизити ефективність алгоритмів синхронізації, збільшуючи час і енергію, необхідні для синхронізації, і збільшуючи складність і накладні витрати мережі. З іншого боку, багатоступенева синхронізація може підвищити продуктивність мереж WSN, збільшуючи радіус дії та покриття мережі і дозволяючи нові додатки, які потребують більших відстаней і більших територій.

Гібридна синхронізація

Алгоритми гібридної синхронізації дозволяють досягти балансу між точністю та ефективністю, поєднуючи кілька методів синхронізації. Однак гібридна синхронізація вимагає додаткових витрат на обробку та комунікацію, таких як координація, синхронізація та адаптація. Тому гібридна синхронізація може знизити ефективність алгоритмів синхронізації за рахунок збільшення часу та енергії, необхідних для синхронізації, а також збільшення складності та накладних витрат мережі. З іншого боку, гібридна синхронізація може підвищити продуктивність WSN, дозволяючи нові додатки, які вимагають більш високої точності і ефективності, ніж кожна методика окремо, і використовуючи сильні сторони різних методів синхронізації.

Таблиця 3.9

Порівняння запропонованих методів

Запропонований метод	Вплив на продуктивність	Вплив на ефективність
Калібрування	Зменшення	Збільшення
Виправлення помилок	Збільшення	Зменшення
Топологія мережі	Зменшення	Зменшення
Синхронізація Multihop	Збільшення	Зменшення
Гібридна синхронізація	Збільшення	Зменшення

3.9 Типи та категорії протоколів синхронізації часу: систематизація та класифікація

У мережах синхронізація часу має вирішальне значення для забезпечення точності та співпраці між багатьма вузлами. Вона надає розподіленим системам стандартну основу для вимірювання, координації подій та послідовності операцій. Створення ефективних протоколів синхронізації часу є дуже важливим з огляду на глобалізацію мереж та зростаючу складність сучасних додатків.

Залежно від функціональності, вимог до точності та мережевого середовища створено багато типів і категорій протоколів синхронізації часу. Систематизація та класифікація цих протоколів створює основу для майбутніх

досліджень і розробок, а також допомагає зрозуміти різні методи синхронізації часу.

Зараз ми розглянемо різні теорії синхронізації, що використовуються в мережах. Слід зазначити, що принципи синхронізації можуть змінюватися залежно від необхідної точності, типу мережі та мережевого середовища. Тим не менш, забезпечення узгодженості часу між вузлами мережі є кінцевою метою будь-якої концепції:

1. *Централізована синхронізація:* Для централізованої синхронізації необхідний центральний вузол, який поширює інформацію про синхронізацію на всі вузли мережі. Точний час встановлюється цим центральним вузлом, який потім розсилає його іншим вузлам, щоб вони могли синхронізуватися. У мережах з невеликою кількістю вузлів централізована синхронізація може бути успішною, але зі збільшенням розміру мережі або коли з'являються вузли з обмеженими ресурсами, вона стає більш складною.

2. *Децентралізована синхронізація:* Децентралізована синхронізація передбачає розподіл відповідальності за синхронізацію між багатьма вузлами мережі. Кожен вузол може вимірювати і коригувати свій внутрішній годинник, використовуючи дані від інших вузлів[33]. Для децентралізованої синхронізації зазвичай використовуються протоколи на основі повідомлень, які дозволяють вузлам обмінюватися інформацією та вирішувати проблеми синхронізації[32].

3. *Розподілені протоколи синхронізації:* Спільне зобов'язання кожного вузла в мережі підтримувати синхронізацію є основою протоколів розподіленої синхронізації. Ділячись часовими вимірами та інформацією з іншими вузлами, кожен вузол може допомогти в процесі синхронізації. Обробляючи дані з кількох джерел разом, методи розподіленої синхронізації зазвичай спрямовані на досягнення високої точності та надійності.

4. *Ієрархічні протоколи синхронізації:* Ієрархічна структура вузлів використовується протоколами ієрархічної синхронізації для забезпечення синхронізації. Така структура має вузли верхнього рівня, які відповідають за інформування вузлів нижнього рівня про синхронізацію. Це зменшує

навантаження на мережу і полегшує підтримку синхронізації.

Таблиця 3.10

Порівняльна інформація про концепції забезпечення синхронізації в мережах

Централізована синхронізація:
Приклад: Network Time Protocol (NTP)
Переваги: Висока точність, можливість синхронізації великих мереж.
Недоліки: Велика залежність від центрального вузла, обмежена мобільність.
Децентралізована синхронізація:
Приклад: RBS, TPSN
Переваги: Можливість розподіленої відповідальності, більша мобільність.
Недоліки: Менша точність порівняно з централізованою синхронізацією, обмежені можливості синхронізації великих мереж.
Розподілені протоколи синхронізації:
Приклад: FTSP, TESLA
Переваги: Висока точність та надійність, обробка інформації з декількох джерел.
Недоліки: Вимагає більшої обчислювальної потужності, важкість підтримки великих мереж.
Ієрархічні протоколи синхронізації:
Приклад: TTD, TICER
Переваги: Ієрархічна структура для покращеної синхронізації, зменшення навантаження на мережу.
Недоліки: Складність підтримки ієрархічної структури, обмежені можливості мобільності.

Висновки

У даному розділі по аналізу та вдосконаленні алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах були розглянуті різні методи та протоколи, спрямовані на досягнення точної синхронізації часу між вузлами мережі. Ми розглянули такі методи, як множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA), множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA) та множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA), кожен з яких має свої переваги та обмеження в залежності від вимог мережі.

Також були розглянуті специфічні протоколи синхронізації, такі як Timing-Sync Protocol for Sensor Networks (TPSN), Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP), Tiny-Sync та Mini-Sync, які враховують особливості мобільних сенсорних мереж та покращують точність синхронізації.

Для оцінки ефективності та продуктивності запропонованих алгоритмів синхронізації були використані різні метрики, включаючи споживання енергії, час синхронізації та точність. Також були розглянуті методи оцінки та удосконалення алгоритмів синхронізації з метою забезпечення кращої продуктивності та ефективності в мобільних сенсорних мережах.

Окрім того, була проведена систематизація та класифікація типів та категорій протоколів синхронізації часу, що дозволяє визначити різні підходи до синхронізації, враховуючи їх особливості та характеристики.

Синхронізація часу в мобільних сенсорних мережах є важливим завданням для забезпечення координації та ефективної роботи мережі. Вибір підходу до синхронізації залежить від вимог до точності, мобільності, енергоефективності та інших факторів. Оцінка та вдосконалення алгоритмів синхронізації сприяє поліпшенню продуктивності та ефективності мобільних сенсорних мереж.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Мобільні сенсорні мережі останнім часом викликають великий інтерес, оскільки вони широко використовуються в багатьох сферах людського життя. Синхронізація часу між сенсорними вузлами є однією з основних проблем при плануванні та побудові таких мереж.

Для великої кількості сенсорних застосувань забезпечення спільної часової осі має важливе значення, оскільки дані, які вони передають, повинні бути точними і сфокусованими, щоб дати повне уявлення про об'єкт, подію або середовище, за яким ведеться спостереження.

Традиційні алгоритми синхронізації годинника для кабельних мереж не можуть бути використані, оскільки протоколи мобільних сенсорних мереж вимагають динамічної адаптації, здатності керувати мобільністю датчиків і масштабованості. Однак, через обмежену ємність батареї та широкий спектр застосувань для WSN, часто неможливо підзарядити або замінити батарею, коли вона розряджається. (часто у важкодоступних місцях). Крім того, вони повинні функціонувати в умовах ненадійності та високого рівня втрат. Розробка методів синхронізації для мобільних сенсорних мереж наразі йде повним ходом.

У цьому дослідженні обговорюється важливість синхронізації, обмеження, пов'язані з синхронізацією в мережах WSN, а також основні методи та принципи синхронізації.

За різними характеристиками методи синхронізації часу в MCM класифікуються. З огляду на точність, надійність, енергоефективність та складність, представлено огляд та аналіз сучасних методів синхронізації часу для мобільних сенсорних мереж. Підкреслено їх переваги та недоліки. Згідно з дослідженням, залежно від особливостей та умов використання MCM, замість оптимальних методів синхронізації у всіх ситуаціях застосовуються компромісні рішення.

Алгоритми синхронізації мають вирішальне значення для мобільних сенсорних мереж, щоб гарантувати, що дані мають точну часову мітку і є

надійними для аналізу та прийняття рішень. Традиційні алгоритми, що базуються на часі та подіях, мають обмеження, такі як перекіс годинника та споживання енергії. Запропоновані рішення, такі як гібридні алгоритми та розподілені алгоритми, продемонстрували багатообіцяючі можливості для покращення точності синхронізації та зменшення споживання енергії. Однак точність розподілених алгоритмів сильно залежить від кількості сусідів, з якими може зв'язуватися датчик, і існує межа для цього через обмеження дальності зв'язку. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на подолання цих обмежень і розробку більш ефективних алгоритмів синхронізації для мобільних сенсорних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. BRÖRING, A. et al. New generation sensor web enablement. Sensors, 11, 2011, pp. 26522699. ISSN 1424-8220. Available from: doi:10.3390/s110302652
2. Yole Development SA. MEMS technology: World's smallest barometric pressure sensor. Micro News, 2009, 78:1.
3. K AHN, J. M., K ATZ, R. H. and PISTER, K. S. J. Mobile Networking for Smart Dust. ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99), Seattle, WA, August 17-19, 1999.
4. ANG, R.J., TAN, Y.K. and PANDA, S.K. Energy harvesting for autonomous wind sensor in remote area. 33rd Annual IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON'07), Taipei, Taiwan, 2007.
5. TANG, L. and GUY C. Radio frequency energy harvesting in wireless sensor networks. International conference on communications and mobile computing, 2009, pp. 644648.
6. Courtesy of Shenyang Institute of Automation, Shenyang, China, 2014.
7. IEEE 802.15.4e-2012, IEEE Standard for local and metropolitan area networks – Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer.
8. IEEE Std 802.11™-2012, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society, March 2012.
9. PISTER, K. and DOHERTY, L. TSMP: Time synchronized mesh protocol. [C]. Proceedings of the IASTED International Symposium, Distributed Sensor Networks (DSN 2008), 2008, pp. 391398. Available from: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/2008/TSMP%20DSN08.pdf>
10. SHELBY, Z. and BORMANN C. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2009. Available from: <http://elektro.upi.edu/pustaka.elektro/Wireless%20Sensor%20Network/6LoWPAN.pdf>
11. Sensinode. Available from: www.sensinode.com/EN/products/software.

[html](#)

12. Elsabrouty, M., & Youssef, M. (2016). Time synchronization in mobile sensor networks: a survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 5, 1-30.
13. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008.-328с.,іл.
14. О.І. Лисенко,С.М. Чумаченко,І.С. Романченко. Математичні моделі та інформаційні технології оцінки і прогнозування стану природного середовища випробувальних полігонів. моногр. - К.: МО України. ЦНДІ ЗС України, 2009.ISBN 978-966-655-498-0
15. Ganeriwal, S., Kumar, R., & Srivastava, M. B. (2003, May). Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems* (pp. 138-149).
16. Синявіна, Є. П. (2021). СИНХРОНІЗАЦІЯ ЧАСУ В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Збірник матеріалів Міжнародної науковотехнічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», 328–330. вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/231326>
17. ЛисенкоО.І., ТачинінаО.М., АлексєєваІ. В. «Математичніметодимодельованнятаоптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник» – К.: НАУ, 2017. – 212 с. ISBN 978-966-932-063-6 .
18. 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.
19. ЛисенкоО.І., АлексєєваІ.В. Дослідженняоперацій. Конспект лекцій. — К:НТУУ «КПІ», 2016. – 196 с.
20. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Науковадумка, 2017. – 730 с.
21. Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М.Ю.Ільченка, С.О.Кравчука: монографія. - Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН

України, 2019.- 336 с. Рекомендовано до друку ВР КПІ ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2.

22. 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.

23. Глобал.С., ДяденкоО.М., ПилипенкоА.Ю., СкулишМ.А. Математичні методи аналізу та керування телекомунікаційними мережами. К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2017. – 234 с.

24. 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.

25. Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course [S084-Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017. <https://www.hufocw.org/Course/263>.

26. Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course “Digital automatic control systems for information communications engineers”, 14 Lectures. Spring 2020. <https://www.hufocw.org/Course/197>.

27. Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці: Методичні рекомендації до виконання практичних занять [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 46 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41977>.

28. Основи теорії цифрових систем автоматичного керування: ЛТІ моделі для систем SISO та MIMO [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. –

Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 196 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41978>.

29. Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачинінв О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. – К.: НАУ, 2016. – 332 с.

30. 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

31. W. Su, I. Akyildiz, Time-Diffusion Synchronization Protocols for Sensor Networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007.

32. A. Detti, C. Pisa, S. Salsano, N. Blefari-Melazzi, “Wireless Mesh Software Defined Networks (wmSDN),” IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Oct 2013, pp. 89–95.

33. 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.

34. Zhou, Y., Mao, Y., & Li, B. (2019). TimeSync: A high-accuracy and energy-efficient synchronization protocol for mobile sensor networks. IEEE Internet of Things Journal, 6, 576-588.

35. Hsu, C. C., & Chang, Y. J. (2019). An efficient distributed algorithm for time synchronization in mobile wireless sensor networks. Wireless Networks, 25, 2527-2538.

36. Truong, C., & Kim, K. H. (2020). A new synchronization algorithm for wireless sensor networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67, 269-277.