

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено
Завідувач кафедри
_____ Сергій КРАВЧУК

“__” _____ 2021р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,

на тему: Розвиток алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах

Виконала: студентка 4 курсу, групи ТМ-71

_____ Синявіна Євгенія Павлівна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ професор кафедри ТК д.т.н. Лисенко О.І. _____

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

(підпис)

Рецензент _____ д.т.н., с.н.с., професор каф. ІТМ, Скуліш М.А. _____

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

(підпис)

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

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ___ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Синявіної Євгенії Павлівни

1. Тема роботи : Розвиток алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах

керівник роботи професор кафедри телекомунікацій Олександр Іванович Лисенко д.т.н., професор _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 14 квітня 2021 р. № 1007-с

2. Термін подання студентом роботи _____ 7 червня 2021р. _____

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи

1. _____ Ог
ляд особливостей бездротових сенсорних мереж
2. _____ Ос
обливості синхронізації мобільних сенсорних мереж
3. _____ Ан
аліз алгоритмів та методів синхронізації мобільних сенсорних мереж

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

1. _____ Т
итульна сторінка
2. _____ За
вдання бакалаврської дипломної роботи
3. _____ О
гляд бездротових сенсорних мереж
4. _____ В
имоги до систем синхронізації для мобільних сенсорних мереж
5. _____ Е
лементи, що сприяють помилкам синхронізації
6. _____ R
eference Broadcast Synchronization, RBS
7. _____ Ti
ming-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN
8. _____ Fl
ooding Time Synchronization Protocol, FTSP
9. _____ O
цінка алгоритмів синхронізації часу
10. _____ В
исновки

6. Дата видачі завдання . _____ 7 жовтня 2020 р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд сучасних бездротових сенсорних мереж	12-19.04.2021	
2	Огляд особливостей мобільних сенсорних мереж	12-19.04.2021	
3	Розвиток способів синхронізації в БСМ на основі годинників у розподілених системах	19-26.04.2021	
4	Оцінка ефективності способів синхронізації на основі порівняльного аналізу протоколів синхронізації часу	19-26.04.2021	
5	Аналіз і оцінка енергетичної ефективності	26.04-3.05.2021	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації результатів практики		

Студент

Євгенія СИНЯВІНА

Керівник

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 69 сторінки, 16 рисунків, 4 таблиці. Було використано 28 джерел.

Мета роботи: проаналізувати існуючі протоколи синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах, розглянути їх особливості, характеристики та тенденції розвитку.

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

Ключові слова: БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, СИНХРОНІЗАЦІЯ, ГОДИННИК, ЧАС, ВУЗОЛ, ДАТЧИК, ЗАТРИМКА

ABSTRACT

The work contains 69 pages, 16 figures, 4 tables, 28 sources have been used.

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

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

Key words: WIRELESS SENSOR NETWORKS, SYNCHRONIZATION, CLOCK, TIME, UNIT, SENSOR, DELAY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	12
1.1 Структура БСМ	12
1.2 Характерні особливості БСМ.....	14
1.2.1 Вузли датчиків	15
1.2.2 Технологія мініатюризації датчика на основі MEMS..	16
1.2.3 Технологія збору енергії навколишнього середовища.....	17
1.3 Технологія мережевого доступу.....	19
1.4 Історія і промислові стимули розвитку БСМ.....	20
1.5 Висновки з розділу 1.....	24
2 ОСОБЛИВОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	26
2.1 Топологія сенсорних мереж	26
2.1.1 Самокеровані надійні мережеві технології	27
2.1.2 Технології дешевих IP-з'єднань	28
2.1.3 Саморегульована технологія управління потоками....	29
2.2 Групування даних.....	30
2.3 Синхронізація вузлів в сенсорних мережах.....	32
2.3.1 Джерела помилок синхронізації часу.....	34
2.3.2 Вимоги до схем синхронізації для сенсорних мереж..	35
2.4 Висновки з розділу 2	36
3 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ТА МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	37

3.1	Методи синхронізації для безпроводних сенсорних мереж	37
3.1.1	Традиційна синхронізація часу (Traditional Time Synchronization, TTS).....	39
3.1.2	Довідкова синхронізація трансляції (Reference Broadcast Synchronization, RBS).....	40
3.1.3	Протокол синхронізації таймінгів для сенсорних мереж (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN).....	42
3.1.4	Tiny-Sync та Mini-Sync.....	46
3.1.5	Алгоритми синхронізації на основі дерева.....	47
3.1.6	Протокол синхронізації часу затоплення.....	49
3.2	Споживання енергії схем синхронізації.....	50
3.3	Оцінка алгоритмів синхронізації часу	52
3.4	Класифікація протоколів синхронізації часу	54
3.4.1	Концепції забезпечення синхронізації.....	55
3.4.2	Способи синхронізації відповідно до особливостей мереж.....	60
3.5	Висновки з розділу 3	63
	ВИСНОВКИ.....	65
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	66

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 затоплення

GPS (Global Positioning System) – система глобального позиціонування

GTSP (Gradient Time Synchronization Protocol) – 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 (Lightweight time synchronization) – легка деревовидна

синхронізація

NTP (Network Time Protocol) – протокол мережевого часу

PBS (Pairwise Broadcast Synchronization) – попарна ширококомвна

синхронізація

RBS (Reference Broadcast Synchronization) – синхронізація

широкомовної передачі

ROS (Reciever-only synchronization) – синхронізація лише приймача

RRS (Reciever-to-receiver synchronization) – приймач-приймач

синхронізація

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

синхронізація

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

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

TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) – протокол синхронізації часу для сенсорних мереж

UTC (Coordinated Universal Time) – всесвітній координований час

WSN (Wireless Sensor Network) – бездротова сенсорна мережа

BSM – бездротова сенсорна мережа

ВСТУП

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

Об'єктом дослідження є бездротові сенсорні мережі, а **предметом** — розвиток способів синхронізації в них.

Актуальність теми даної роботи обумовлена тим, що, як вже було згадано вище, бездротоові сенсорні мережі здобувають все більшу популярність, а проблема синхронізації, як і у всіх розподілених системах, є критично важливою, оскільки проектування багатьох протоколів і реалізація програм вимагають точного часу. Для виконання свого призначення БСМ повинна обмінюватися даними, а для ефективної комунікації також потрібна синхронізація часу між вузлами датчиків. Також варто зазначити, що ефективна часова синхронізація позитивно впливає на енергозбереження в мережі.

Метою роботи є дослідження особливостей експлуатації бездротових сенсорних мереж, огляд протоколів, способів та підходів до синхронізації

часу. Також буде розглянуто тенденції і напрямки розвитку способів синхронізації в БСМ.

У першому розділі наведено огляд особливостей побудови сучасних бездротових сенсорних мереж, їх топологій, сфер застосування та обмежень, притаманних БСМ.

У другому розділі розглядається необхідність синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах, проблеми та обмеження, притаманні синхронізації в БСМ, основні вимоги до неї. Представлено коротку історичну довідку стосовно питання розвитку синхронізації.

Третій розділ містить у собі розгляд годинників у бездротових сенсорних мережах, неточності у роботі годинників та причини їх виникнення; проаналізовано критерії, по яким можна класифікувати протоколи синхронізації часу в БСМ, а також присвячений аналізу методів синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах, наведені основні протоколи, їх переваги та недоліки.

1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗДРОВОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Структура БСМ

Бездротова сенсорна мережа (Wireless Sensor Network) - це розподілена, зі здатністю до самокерування мережа великої кількості датчиків (сенсорів, мотів - від англ. "Mote" - порошинка, названих так через тенденцію до мініатюризації) і виконавчих пристроїв (рис.1.1), об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Область покриття подібної мережі може становити від декількох метрів до декількох кілометрів за рахунок здатності ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого. В склад мотів зазвичай входять автономні мікрокомп'ютери (контролери) з живленням від батарей і приймачі, що дозволяє мотам самоорганізовуватися в спеціалізовані мережі, зв'язуючись один з одним і обмінюючись даними за допомогою радіозв'язку. В цьому випадку, моти виступають як компоненти бездротових сенсорних мереж. Дані від окремих вузлів передаються по мережі від вузла до вузла на шлюз, і зазвичай виявляються на «супер-вузлі», або сервері, маючому більш високу обчислювальну потужність.

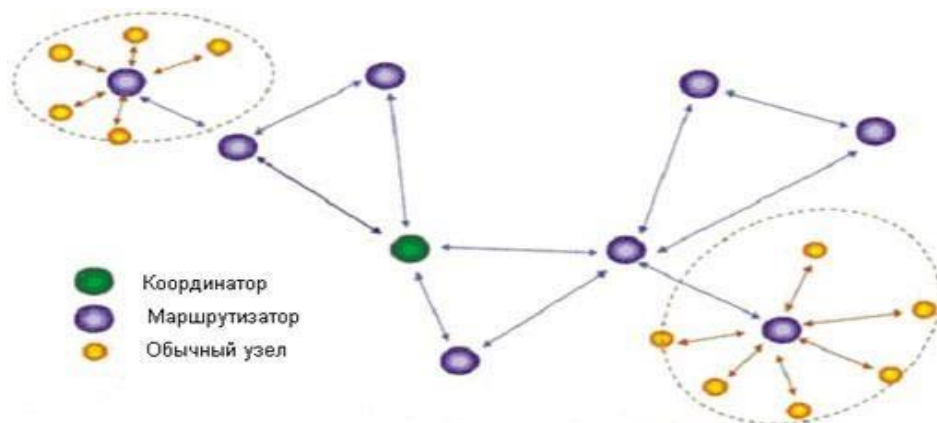


Рис. 1.1 Архітектура бездротової сенсорної мережі

Топологія мережі - важлива модель стану мережі, оскільки вона дає багато інформації про активні існуючі вузли і зв'язність мережі. Так як

Бездротові сенсорні мережі мають обмежені енергетичні ресурси, алгоритми збору інформації про топологію повинні передбачати низьке енергоспоживання. Залежно від вимог предметної області, формування топології сенсорної мережі може відбуватися в двох режимах: топологія типу "зірка" (ієрархічна топологія), або багатострибкова топологія (точка-точка, однорідна топологія). Коли діапазон передачі радіоканалу всіх сенсорних вузлів досить великий, і вузли можуть передавати свої дані безпосередньо до базової станції, вони можуть утворювати зіркоподібну топологію, як показано зліва на рисунку 1.2. У цій топології кожен вузол безпосередньо пов'язується з базовою станцією з використанням одноразової передачі в радіоканалі. Проте, сенсорні мережі часто охоплюють великі географічні райони та потужність радіопередавача повинна бути зведена до мінімуму з метою економії енергії. Отже, «багатострибкова» передача є більш поширеним випадком для сенсорних мереж (зображено праворуч рис 1.2). У цій топології сітки вузли повинні не тільки збирати і передавати свої власні дані, але також служити в якості транзитних точок для інших вузлів. Тобто, вони повинні взаємодіяти для передачі даних інших вузлів до базової станції. Виникає проблема маршрутизації - завдання пошуку шляху з декількома кроками ретрансляції від вузла до базової станції, яка є однією з найбільш важливих проблем в БСМ. Коли вузол служить транзитним пунктом для декількох маршрутів, він часто має можливість аналізу даних сенсорів для попередньої обробки, що може привести до ліквідації надлишкової інформації або агрегації даних, які можуть бути стиснуті, в порівнянні з вихідним станом.

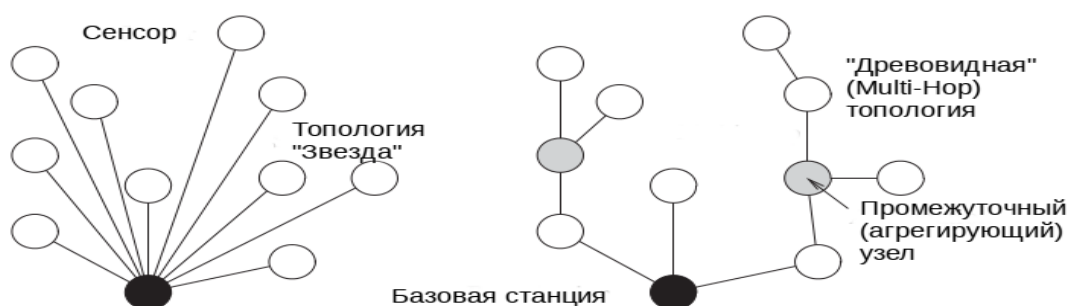


Рис.1.2 «Однострибкова» і «багатострибкова» топологія в сенсорних мережах

Що стосується топології типу "зірка", то передбачається, що мережа складається з об'єктів двох типів: повнофункціональні об'єкти та об'єкти зі зменшеною функціональністю. Вся мережа розбивається на сегменти, де об'єкти першого типу виступають в ролі координаторів сегментів мережі. Об'єкти першого типу можуть вести спілкування з об'єктами другого типу і між собою. Об'єкти другого типу можуть вести спілкування тільки з об'єктами першого типу. З огляду на підвищені навантаження, повнофункціональні пристрої можуть бути стаціонарними і мати живлення від зовнішніх джерел. Такий спосіб організації мережі може бути затребуваний для вирішення обмеженого кола завдань, наприклад в промисловості.

Другий варіант організації роботи мережі - "однорідна" топологія, коли не потрібне розбиття мережі на сегменти (кластери) і всі об'єкти можуть вести спілкування між собою в межах області видимості, при цьому вся мережа може як розбиватися на сегменти, керовані координаторами, так і не робити цього. Даний підхід до формування мережі дозволяє організовувати більш складні конфігурації мережі, адаптувати такі мережі до вирішення складніших і нестандартних завдань. Подібна гнучкість досягається завдяки тому, що при такому підході окремі об'єкти можуть самостійно організовуватися мережу і адекватно реагувати на зміни в топології мережі з часом.

1.2 Характерні особливості БСМ

Бездротові сенсорні мережі (БСМ), як правило, можна охарактеризувати як мережу вузлів, які кооперативно відчують і контролюють навколишнє середовище, що дозволяє взаємодіяти між людьми або комп'ютерами та навколишнім середовищем [1]. БСМ в даний час

зазвичай включають сенсорні вузли, вузли приводних пристроїв, шлюзи та клієнтів. Велика кількість сенсорних вузлів, розгорнутих випадковим чином всередині або поблизу зони моніторингу (поле виявлення), утворюють мережі через самокерування. Вузли датчиків відстежують зібрані дані для передачі вздовж інших вузлів датчика стрибковим методом. У процесі передачі відстежуються дані можуть оброблятися декількома вузлами, щоб дістатися до вузлів шлюзу після маршрутизації з декількома переходами для того щоб, дістатися до вузла управління через Інтернет або супутник. Саме користувач виконує конфігурацію і керує БСМ за допомогою вузла керування, публікує моніторингові місії та збір контрольованих даних.

У міру розвитку супутніх технологій вартість обладнання БСМ різко знизилася, і можливість їх застосування поступово розширюється з військових областей на промислові та комерційні. Тим часом, стандарти для технології БСМ були добре розроблені, такі як WirelessHart, ISA 100.1a, бездротові мережі для промислової автоматизації - автоматизація процесів (WIA-PA) тощо. Окрім того, з появою нових режимів застосування БСМ у промисловій автоматизації та домашніх додатках, загальний обсяг ринку БСМ додатків буде швидко зростати.

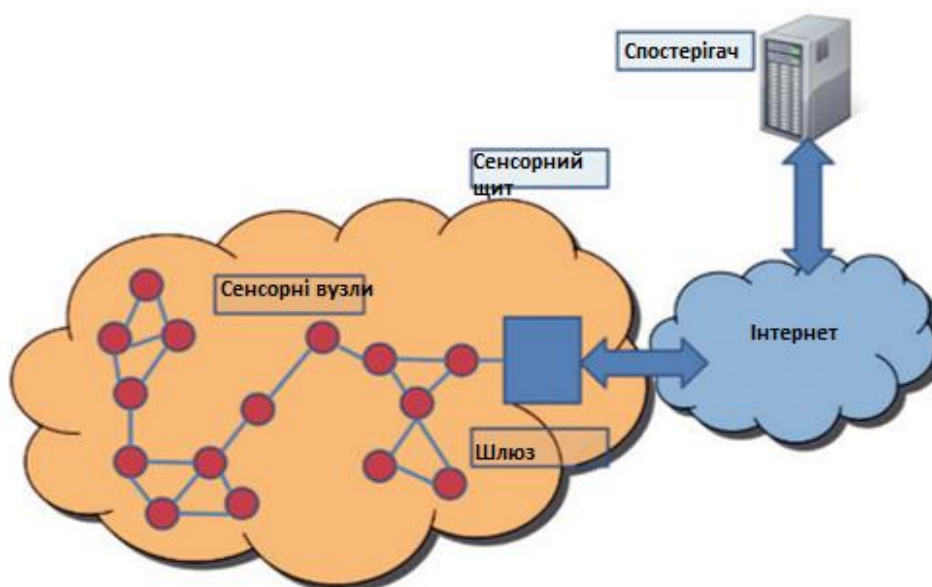


Рис 1.2. Бездротові сенсорні мережі

1.2.1 Вузли датчиків

Сенсорний вузол є однією з основних частин БСМ. Апаратне забезпечення сенсорного вузла, як правило, включає чотири частини: силовий модуль та модуль керування енергоживленням, датчик, мікроконтролер та бездротовий приймач, див. рис 1.2.1 Блок живлення забезпечує надійну потужність, необхідну для роботи системи. Датчик є зв'язком вузла БСМ, який може отримати стан навколишнього середовища та обладнання. Датчик відповідає за збір і перетворення таких сигналів, як світло, вібрація та хімічні сигнали, в електричні сигнали, а потім передає їх на мікроконтролер. Мікроконтролер приймає дані від датчика і відповідно обробляє дані. Потім бездротовий приймач (RF-модуль) передає дані, щоб можна було досягти фізичної реалізації зв'язку.

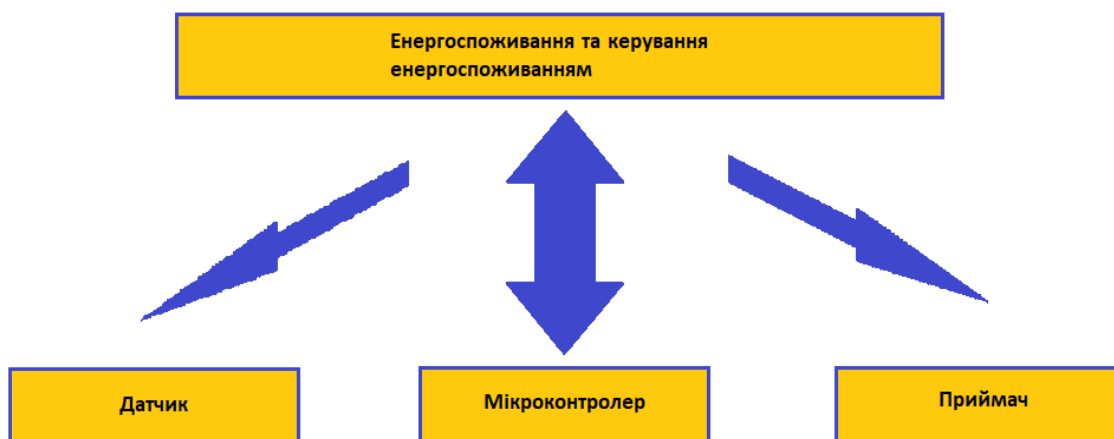


Рис.1.2.1 Апаратна структура вузла БСМ-датчика

Важливо, щоб конструкція всіх частин вузла БСМ враховувала особливості вузла БСМ невеликого розміру та обмеженої потужності

1.2.2 Технологія мініатюризації датчика на основі MEMS

Технологія мініатюризації вузлів БСМ на основі мікроелектромеханічних систем (MEMS) досягла значного прогресу за останні роки. Основою технології MEMS є можливість реалізації поєднання

технології мікроелектроніки, технології мікрообробки та технології упаковки. На основі мікроелектроніки та технології мікрообробки можуть бути створені різні рівні 2D та 3D мікроскладових структур, які можуть бути мініатюрними чутливими елементами. Ці мініатюрні чутливі елементи, пов'язані з ними ланцюги живлення та перетворення сигналу можуть бути зібрані разом та упаковані як мініатюрний датчик MEMS.

На даний час на ринку вже існує багато типів мініатюрних датчиків MEMS, які можна використовувати для вимірювання різноманітних фізичних, хімічних та біологічних сигналів, включаючи зміщення, швидкість, прискорення, тиск, напругу, деформацію, звук, світло, електричний струм, магнетизм, тепло, значення pH тощо [2]. У 2003 році дослідники з Каліфорнійського університету в Берклі (UCB) розробили вузол датчика БСМ (mote) з мікросенсором. Фактичний розмір його сенсорного модуля MEMS становив лише 2,8 мм × 2,1 мм [3].

1.2.3. Технологія збору енергії навколишнього середовища

Вузли потребують джерела енергії, а збирання навколишньої енергії із зовнішніх джерел використовується для живлення невеликих автономних датчиків, таких як ті, що базуються на технології MEMS. Ці системи часто дуже малі і вимагають невеликої потужності, однак їх застосування обмежується залежністю від заряду акумулятора.

Збирання енергії навколишнього середовища не може бути реалізоване лише за допомогою звичайної генерації енергії з оптичних елементів, але також за допомогою мініатюрних п'єзоелектричних кристалів, мікрогенераторів, елементів термоелектричної енергії або пристроїв прийому електромагнітних хвиль [4] [5].

Деякі компанії почали комерціалізувати додатки сенсорних мереж із використанням пристроїв, що приймають енергію. Наприклад, німецька компанія EnOcean поставила пристрої для збору легкої енергії, пристрої для

збору енергії вібрації та пристрої для збору енергії на основі температури для інтелектуального освітлення будівель та контролю повітря. Що стосується обладнання та будівельного контролю стану здоров'я, на ринок вийшли різноманітні п'єзоелектричні засоби для збирання енергії вібрації. Британська компанія Regretium пропонує серію продуктів, які перетворюють механічну вібрацію в електричну енергію, що використовується для постійного живлення автономних, необслуговуваних промислових бездротових сенсорних вузлів. Для цих вузлів датчика енергія вібрації, яку виробляють стукачі, що стукають у стіл, може підтримувати вузол датчика, що посилає дані на 2 кБ на 100 м кожні 60 секунд.

Для моніторингових застосувань систем трубопроводів була розроблена велика кількість продуктів на основі збирання енергії різниці температур. Продукція компанії Nextreme може виробляти 0,25 Вт потужності при перепаді температур 60°C на площі $3,2\text{ мм} \times 1,6\text{ мм}$. На рис 1.3 та 1.4 показано деякі вузли датчиків, налаштовані за допомогою пристроїв збору навколишньої енергії.

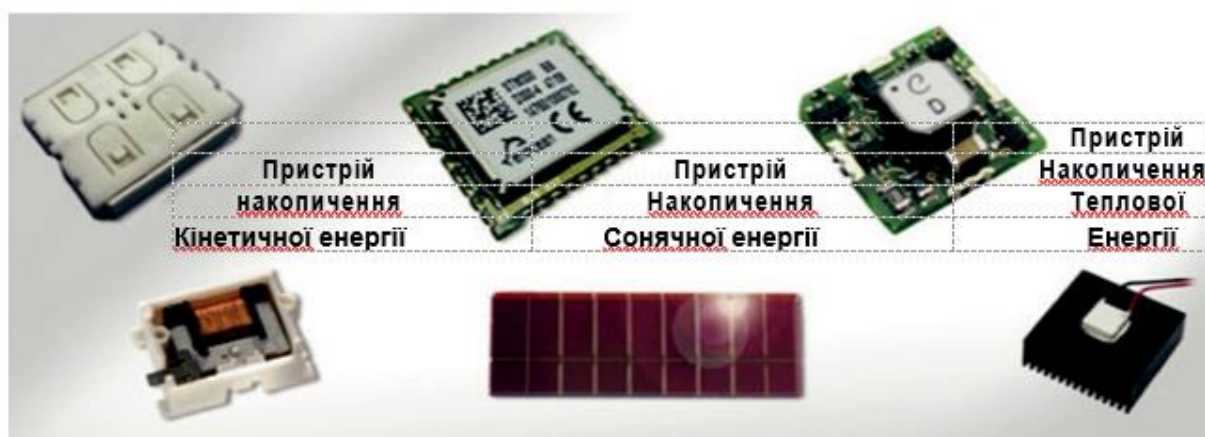


Рис 1.3. Вузли датчиків, зконфігуровані за допомогою пристроїв накопичення енергії з навколишнього середовища [6]



Рис. 1.4 Система контролю двигуна на основі накопичення енергії вібрації [6]

1.3 Технологія мережевого доступу

Мережа доступу, довжина якої коливається від кількох сотень метрів до декількох миль, включає всі пристрої між магістральною мережею та користувальницькими терміналами. Таким чином, це влучно називають "останньою милею".

Оскільки магістральна мережа зазвичай використовує оптичну волоконну структуру з високою швидкістю передачі, мережа доступу стала вузьким місцем усієї мережевої системи.

Як показано на (рис 1.5), через відкриту властивість бездротових каналів конфлікти відбуватимуться у часі, просторі або частотному вимірі, коли канал буде спільним для кількох користувачів. Функція мережевих технологій доступу полягає в управлінні та координації використання ресурсів каналів для забезпечення взаємозв'язку та зв'язку кількох користувачів на загальному каналі.

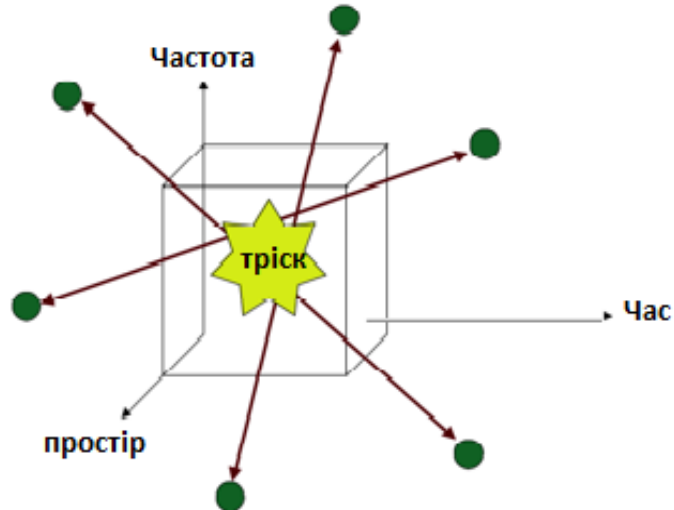


Рис. 1.5. Технології доступу [6]

Відповідно до відстані та швидкості доступу існуючі технології доступу можна класифікувати на чотири категорії: бездротова локальна мережа (WLAN), бездротова мережа мегаполісів (WMAN), бездротова персональна мережа (WPAN) та бездротова широкопasmова мережа (WWAN). Однак загальна тенденція розвитку високих швидкостей передачі не підходить для вимог застосування БСМ. Основні причини такі:

- Що стосується надійності, робоче середовище БСМ, як правило, досить суворе. Погані умови середовища з вузькосмуговими багаточастотними шумами, перешкодами та багатопроневими ефектами робить надійну комунікацію на основі рідкісних ресурсів каналу нагальною проблемою, яку необхідно вирішити.
- Що стосується можливостей у реальному часі, програми для БСМ та IoT мають більш суворі вимоги в режимі реального часу, ніж інші. Крихітна затримка може призвести до великої проблеми. Тому у багатьох додатках має бути гарантоване жорстке спілкування в режимі реального часу.
- Що стосується енергоефективності, низьке споживання енергії є ключовим фактором для підтримки тривалого потоку незалежних пристроїв, що працюють від акумуляторів, і для зменшення витрат на технічне

обслуговування. Це також ще одна вимога до бездротових мереж та додатків IoT, особливо до пристроїв із акумуляторами, які важко підлягають заміні.

Відповідно до сучасних специфічних вимог до БСМ-програм, розвиток технології мереж доступу вже значно прогресував. Репрезентативні технології доступу, які є більш систематичними та вартими уваги, - це Bluetooth 4.0, орієнтований на медичний БСМ; IEEE 802.15.4e [7], орієнтований на промисловий БСМ; та WLAN IEEE 802.11™ [8] з огляду на IoT.

1.4. Історія і промислові стимули розвитку БСМ

Розвиток БСМ був натхненний військовими застосуваннями, зокрема спостереженням у зонах конфлікту. Сьогодні вони складаються з розподілених незалежних пристроїв, які використовують датчики для моніторингу фізичних умов, застосовуючи їх до промислової інфраструктури, автоматизації, охорони здоров'я, торгівлі та багатьох споживчих областей.

Дослідження БСМ датуються початком 1980-х років, коли Агентство перспективних дослідницьких проектів оборони США (DARPA) проводило програму розподілених сенсорних мереж (DSN) для американських військових. На той час Мережа Агентства з перспективних дослідницьких проектів (ARPANET) діяла протягом ряду років, в університетах та науково-дослідних інститутах було близько 200 організаторів. Передбачалося, що DSN мають багато просторово розподілених недорогих зондуючих вузлів, які співпрацюють між собою, але працюють автономно, при цьому інформація передається до будь-якого вузла, який найкраще може використовувати інформацію. Незважаючи на те, що перші дослідники сенсорних мереж мали на увазі бачення DSN, технологія була не зовсім готова. Більш конкретно, датчики були досить великими (тобто розмір коробки для взуття і більше), і,

таким чином, кількість потенційних застосувань була обмежена. Крім того, найдавніші DSN не були тісно пов'язані з бездротовим підключенням.

Нещодавні досягнення в обчислювальній техніці, зв'язку та мікроелектромеханічних технологіях призвели до значних зрушень у дослідженнях БСМ та наблизили їх до початкового бачення. Нова хвиля досліджень ЗНС розпочалася приблизно в 1998 році і привертає все більше уваги та міжнародної участі. Нова хвиля досліджень сенсорних мереж зосереджує свою увагу на мережевих технологіях та мережевій обробці інформації підходить для високодинамічних спеціальних середовищ та обмежених ресурсів вузлів датчиків. Більше того, сенсорні вузли були набагато меншими за розміром (тобто від пакета карток до частинок пилу) і набагато дешевшими за ціною, а отже, багато нових цивільних застосувань сенсорних мереж, таких як моніторинг навколишнього середовища, мережа автомобільних сенсорів з'явилися мережі датчиків тіла.

Знову ж таки, DARPA виступив піонером у новій хвилі досліджень сенсорних мереж, запустивши ініціативну дослідницьку програму під назвою SensIT, яка надала сучасним сенсорним мережам нові можливості, такі як спеціальні мережі, динамічні запити та завдання, перепрограмування та завдання. В даний час БСМ розглядаються як одна з найважливіших технологій 21 століття. Наприклад, Китай включив БСМ у свої національні програми стратегічних досліджень. Як результат, комерціалізація БСМ прискорюється, і виникає багато нових технологічних компаній, таких як Crossbow Technology (що з'єднує фізичний світ із цифровим світом) та Dust Networks.

Сьогодні промислова автоматизація є однією з найважливіших сфер застосування БСМ. За даними Freedonia Group, частка світового ринку датчиків для промислового використання становить 11 млрд. Доларів США, тоді як вартість монтажу (переважно кабельних витрат) та використання становить понад 100 млрд. Доларів США. Ця висока вартість є головним

питанням, що перешкоджає розвитку промислових комунікаційних технологій. Технологія БСМ, що дозволяє "повсюдне зондування" протягом усього промислового процесу, може забезпечити важливі параметри, які недоступні в режимі онлайн-моніторингу через причини, зазначені вище. Ці параметри є важливими основами для здійснення оптимального контролю з метою досягнення мети покращення якості продукції та зменшення споживання енергії.

За даними ON World, бездротові пристрої, що встановлюватимуться в промислових полях, зростуть на 553% у період між 2011 і 2016 роками, коли буде 24 мільйони датчиків та приводів з бездротовим підключенням, або точок зондування, розгорнуто у всьому світі. Серед них 39% буде використано для нових додатків, які можливі лише за допомогою бездротової мережі датчиків. До 2014 року кількість приладів БСМ становитиме 15% усіх пунктів вимірювання та контролю промислового обладнання, а до 2016 року - 33%. На сучасному ринку три чверті промислового доходу від БСМ припадає на переробну промисловість; найбільш зростаючими є нафтова та енергетична галузі. Наприклад, PetroChina реалізує проекти IoT у своїх нафтових родовищах з метою реконструкції 200 000 нафтових свердловин. Технологія БСМ, застосована при цифрових перетвореннях нафтових свердловин, використовуватиме онлайн-моніторинг для вимірювання видобутку нафтових свердловин та забезпечення безпеки видобутку.

В енергетичній галузі, яка зараз перебуває на модернізації електромереж, технологія БСМ також відіграє важливу роль у моніторингу безпеки обладнання для передачі та трансформації енергії та реконструкції мільярдів розумних лічильників.

Таблиця 1.1

Порівняння традиційних мереж і БСМ

Традиційні мережі	Бездротові сенсорні мережі
-------------------	----------------------------

Загальноцільові; багато додатків	Одноцільові; обслуговують один додаток
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 відомостей по мережі можливе і централізоване управління здійснене	Більшість рішень приймається без центрального керуючого вузла

Зазначимо основні області застосування БСМ:

- системи оборони і забезпечення безпеки;
- контроль навколишнього середовища;
- охоронні системи;

- моніторинг промислового обладнання;
- пожежна сигналізація;
- моніторинг стану сільськогосподарських угідь;
- управління енергопостачанням;
- контроль систем вентиляції, кондиціонування і освітлення;
- моніторинг фізіологічного стану людини;
- складський облік;
- стеження за транспортуванням вантажів;
- контроль персоналу тощо.

1.5 Висновки до розділу 1:

Таким чином, складні інженерні системи шляхом конвергенції з телекомунікаційними мережами відкрили новий, відмінний від раніше існуючих, напрямок - сенсорні мережі. Вони можуть надавати широкий спектр послуг (від надання даних про значення контрольованого параметра (пасивні датчики) до управління процесами (активні датчики)) та можуть бути використані в багатьох прикладних областях. Еволюцією сенсорних мереж стали бездротові сенсорні мережі (БСМ) - відсутність проводів уможливорює їх застосування у важкодоступних місцях або на мобільних об'єктах, що значно розширило коло застосування сенсорних мереж.

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

2. ОСОБЛИВОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ В БЕЗДРОВОТИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Топологія сенсорних мереж

Як правило, БСМ складається з ряду вузлів сенсорної мережі та шлюзу для підключення до Інтернету. Загальний процес розгортання БСМ такий (рис 2.1): по-перше, вузли сенсорної мережі транслюють свій стан в оточення і отримують статус від інших вузлів для виявлення один одного. По-друге, мережеві вузли датчиків організовані у підключену мережу за певною топологією (лінійна, зірка, дерево, сітка тощо). Нарешті, в побудованій мережі обчислюються відповідні шляхи для передачі даних зондування. Потужність вузлів мережі датчиків зазвичай забезпечується акумуляторами, тому відстань передачі вузлів БСМ невелика. Відстань передачі може становити від 800 до 1000 метрів у відкритому зовнішньому середовищі з прямим прицілом. Він різко зменшиться у випадку захищеного внутрішнього середовища до приблизно декількох метрів. Для того, щоб розширити охоплення мережі, сенсорна мережа використовує режим багатокаскадного передавання. Тобто вузли мережі датчиків є одночасно передавачем і приймачем. Перший мережевий вузол датчика, вузол джерела, надсилає дані до сусіднього вузла для передачі даних на шлюз. Сусідній вузол пересилає дані в один із сусідніх вузлів, що знаходяться на шляху до шлюзу. Переадресація повторюється до тих пір поки дані не надійдуть до шлюзу, пункту призначення. Протоколи та деякі методи впровадження БСМ можуть бути адаптовані до зрілої архітектури та технологій бездротових та дротових комп'ютерних мереж. Однак особливостями БСМ є самоорганізація, самоадаптація, обмежена енергія вузлів та нестабільні лінії передачі.

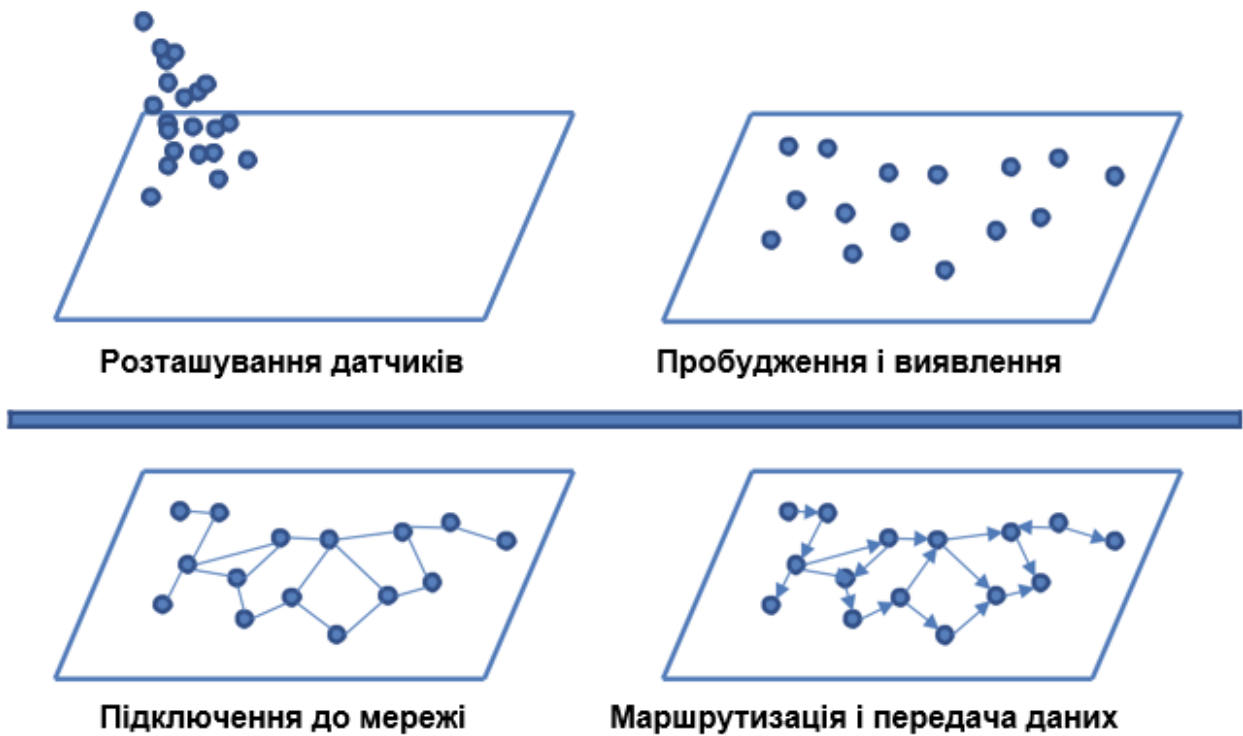


Рис 2.1 Процес організації та передачі даних БСМ

2.1.1 Самокеровані надійні мережеві технології

Положення вузлів БСМ є випадковими, і вузли можуть бути переміщені, захищені та втручатися. Топологія мережевих мереж має великі переваги в гнучкості та надійності порівняно з іншими мережевими топологіями. Підхід до самоорганізації управління мережевими вузлами може значно покращити надійність мережі, що призводить до створення технології інтелектуальної мережевої мережі, як показано на (рис 2.1). У спеціальній мережевій технології Smart Mesh вузол спочатку контролює сусідні вузли та вимірює потужність сигналу, а потім вибирає відповідний сусідній вузол для синхронізації часу та відправляє запит приєднання. Потім сусідній вузол доставляє запит шлюзу. Шлюз отримує запит і призначає мережеві ресурси для вузла. На основі сітчастої мережі вузли датчиків можуть бути призначені двома або більше шляхами передачі для підвищення надійності мережі. Мережа протоколу синхронізованого зв'язку (TSMP) [9]

пилової мережі може підтримувати самокеровану мережу та підтримувати мережу, що складається з ста вузлів.

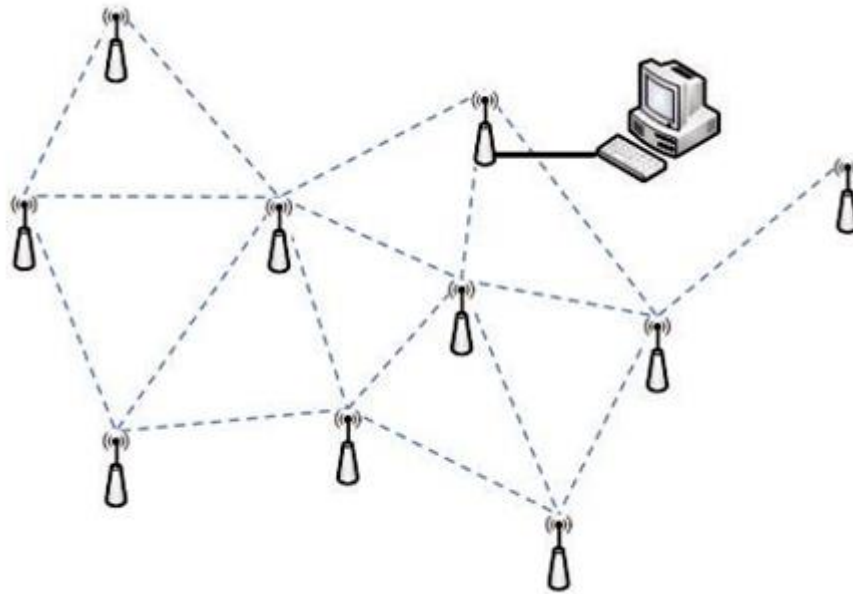


Рис. 2.2 Коміркова самокерована мережа

2.1.2 Технології дешевих IP-з'єднань

У дизайні ранніх сенсорних мереж зазвичай використовувались внутрішні адреси для управління вузлами сенсорної мережі. Довжина адреси була відносно короткою і придатною для реалізації у вбудованих мережевих вузлах малої потужності. Однак внутрішній метод управління адресами не сумісний з методом IP в Інтернеті, що збільшило труднощі взаємодії між вузлами мережі датчиків та традиційними вузлами мережі IP. Отже, існує потреба у вирішенні проблема підключення мережі БСМ та IP. Традиційні адреси IPv4 поступово вичерпуються, а нова технологія IPv6 має величезний адресний ресурс, який підходить для широкого спектру розгортання сенсорної мережі. Як в результаті з'явилася малопотужна бездротова технологія 6LoWPAN на основі IPv6 [10]. 6LoWPAN, як правило, реалізував спрощений протокол IPv6 над шаром зв'язку протоколу IEEE 802.15.4. Стиснення заголовка та фрагментація пакетів перезавантаження здійснюється шляхом додавання рівня адаптації між рівнем IP та рівнем

зв'язку, що є надійним методом для досягнення адаптивності протоколу між мережею IPv6 та мережею датчиків, як показано на (рис 2.3). Продукти сенсорної мережі компанії Sensinode, заснованої на NanoStack [11], та компанії TI, заснованої на CC-6LoWPAN [12], використовують технологію 6LoWPAN для забезпечення можливості масштабованості, безшовного та надійного взаємозв'язку між сенсорною мережею та мережею IP.

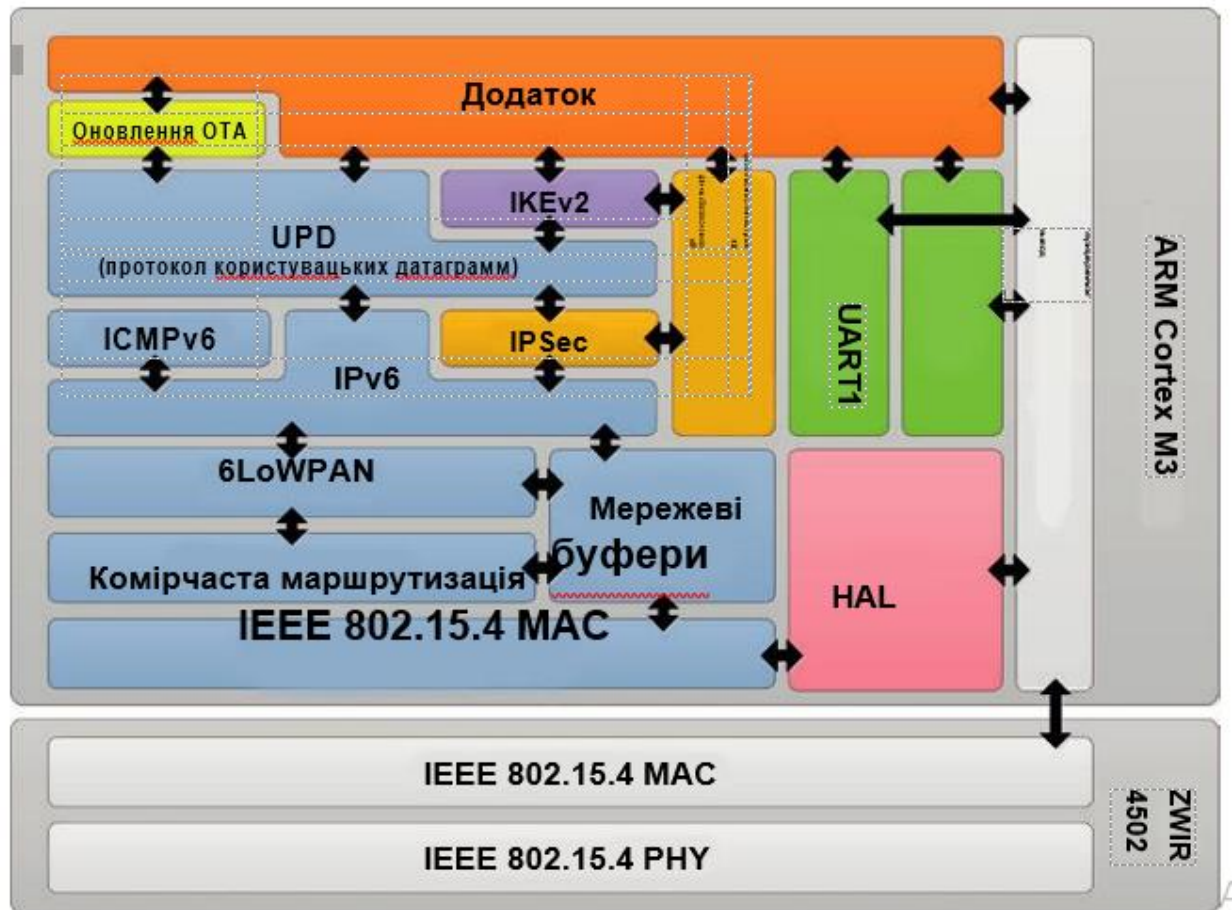


Рис. 2.3 Пакет протоколів 6LoWPAN

2.1.3. Саморегульована технологія управління потоками

Однією з відмінностей бездротових мереж від традиційних дротових мереж є нестабільність бездротового зв'язку. У бездротових мережах зв'язок між вузлами сприйнятливий до перешкод і перекриттів, що призводить до збою передачі сигналу. Традиційна мережа - це стабільна дротова мережа, дані якої будуть втрачені лише через перевантаження. Принцип управління

потокотом полягає в тому, що відправник даних регулює відправляючий трафік відповідно до ситуації втрат при передачі даних. Коли відбувається втрата даних, відправник зменшує швидкість передачі. А коли дані не втрачаються, відправник збільшує швидкість передачі. Такі механізми управління потоком більше не підходять для БСМ [13], оскільки втрата даних у сенсорних мережах здебільшого спричинена перевантаженням, перешкодами та закупорюванням. Чисто зменшення швидкості передачі не може вирішити проблему, а лише знижує продуктивність мережі. Для вирішення проблеми погіршення продуктивності мережі в нестабільних умовах передачі пропонується адаптивне управління потоком. Адаптивний контроль потоку перевіряє причину втрати пакетів та регулює швидкість передачі. Середній час, відповідно до якості посилення та кількість помилок передачі, найкраща швидкість передачі даних для передачі даних між вузлами є пріоритетною, щоб отримати хорошу стабільність мережі, враховуючи відстань передачі та пропускну здатність.

2.2. Групування даних

В енергетичних обмежених сенсорних мережевих середовищах він непридатний у багатьох аспектах заряду акумулятора, здатності обробляти, ємності зберігання даних та пропускну здатність зв'язку для кожного вузла для передачі даних на вузол раковини. Це пояснюється тим, що в сенсорних мережах з високим покриттям інформація, що передається сусідніми вузлами, має певний ступінь надмірності, передаючи таким чином дані окремо в кожному вузлі, одночасно витрачаючи пропускну здатність та енергію всієї сенсорної мережі, що скорочує термін служби мережі.

Щоб уникнути вищезазначених проблем, були введені методи агрегування даних. Агрегація даних - це процес інтеграції кількох копій інформації в одну копію, який є ефективним і здатним задовольнити потреби користувачів у середніх вузлах датчиків.

Впровадження агрегування даних виграє як від економії енергії, так і від отримання точної інформації. Енергія, що споживається на передачу даних, набагато більша, ніж на обробку даних у сенсорних мережах. Тому з локальних обчислювальних та зберігаючі можливостей вузла, операції агрегування даних виконуються для видалення великої кількості надлишкової інформації, щоб мінімізувати обсяг передачі та заощадити енергію. У складному мережевому середовищі важко забезпечити точність інформації, отриманої лише шляхом збору кількох зразків даних з розподілених вузлів датчиків. Як результат, моніторинг даних того самого об'єкта вимагає спільної роботи декількох датчиків, що ефективно покращує точність та надійність отриманої інформації.

Продуктивність протоколу агрегування даних тісно пов'язана з топологією мережі. Тоді можна проаналізувати деякі протоколи агрегування даних відповідно до топологій зірок, дерев та ланцюжкової мережі, як показано на (рис 2.4)

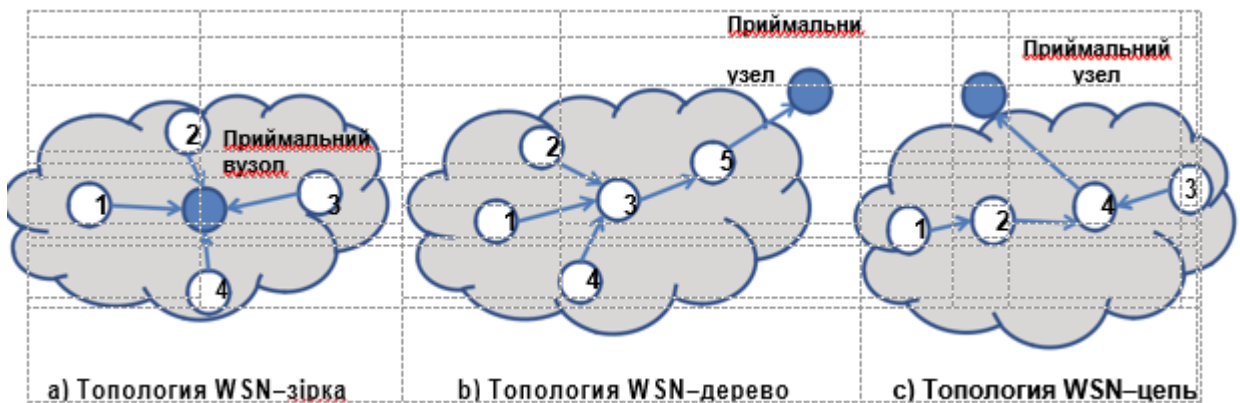


Рис. 2.4 Три види топологій БСМ: зірка, дерево, цепь.[6]

Технологія агрегування даних може заощадити енергію та підвищити точність інформації, одночасно жертвуючи продуктивністю в інших сферах. З одного боку, в процесі передачі даних, пошук агрегуючих вузлів, операції агрегування даних та очікування надходження інших даних, швидше за все, збільшаться в середній затримці мережі. З іншого боку, у порівнянні зі

звичайними мережами, сенсорні мережі мають вищі показники втрати даних. Агрегація даних може суттєво зменшити надмірність даних, але ненавмисно втратити більше інформації, що зменшує надійність мережі датчиків.

2.3 Синхронізація вузлів в сенсорних мережах

Бездротова мережа складається з просторово розподілених автономних пристроїв для спільного моніторингу фізичних або екологічних умов, таких як температура, звук, вібрація, тиск, рух та забруднюючі речовини, в різних місцях. Кожен пристрій оснащений сенсорними компонентами, трансивером для бездротового зв'язку, обчислювальною схемою для обробки та передачі даних в мережі та джерелом енергії, як правило, акумулятором.

Сенсорні мережі - це особливий тип спеціальних мереж, де бездротові пристрої (зазвичай їх називають вузлами в мережі) працюють разом, щоб спонтанно формувати мережу без потреби в будь-якій інфраструктурі [8]. Вузли можуть надсилати дані, отримувати дані або діяти як маршрутизатори в мережі.

Вузли мережі, як правило, статичні та обмежені ресурсами. Вони збирають дані та передають їх у центральний підрозділ, який називається раковиною, для подальшої обробки. Час життя всієї бездротової сенсорної мережі, який визначається як час відсотка вимкнення бездротових вузлів, а не час життя одного пристрою, є одним з основних параметрів при оцінці продуктивності мережі.

Датчики повинні бути розроблені так, щоб витримувати суворі екологічні та географічні умови. Зазвичай додаткові пристрої або датчики розгортаються для досягнення надмірності та компенсації пристроїв, які можуть вийти з ладу (тобто відмова обладнання, загальне споживання енергії акумулятора). Синхронізація часу, яка спрямована на створення загального масштабу часу в мережі, є необхідністю для багатьох додатків. Такі методи контролю доступу, як TDMA, вимагають синхронізації часу для точного

планування доступу до середовища без зіткнень. Крім того, бездротові сенсорні мережі мають обмежені енергетичні ресурси; тому енергозберігаючі методи використовуються для зниження енергоспоживання всієї мережі. Для того, щоб вузли могли вмикати та вимикати свої приймачі-передавачі у відповідний час, потрібен точний час між вузлами мережі. У багатьох додатках використовується злиття даних. Дані, зібрані на різних вузлах, агрегуються та надсилаються на вузол раковини для формулювання рішення. Ці вузли співпрацюють та координують один одного для виконання завдання. Такі типи програм, як виявлення цілей; вимагати точного часу між вузлами, щоб отримати точну оцінку події.

Традиційні методи синхронізації, які використовувались у дротових мережах, не підходять для бездротових мереж. NTP, який широко використовується в Інтернеті, занадто складний для впровадження та не є енергоефективним. GPS, з іншого боку, не є практичним, оскільки пристрій, який потрібно підключити до вузла мережі, є великим і дорогим. Крім того, оскільки датчики зазвичай використовуються в суворих умовах, сигнали GPS часто недоступні.

Схеми комп'ютерних годинників складаються з генератора і лічильника. Виходячи з кутової частоти генератора, лічильник збільшує своє значення, представляючи місцевий тактовий сигнал $C(t)$ мережевого вузла. В ідеальних ситуаціях 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:

$$C_i(t) = a_i t + b_i \quad (1)$$

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:

$$C_1(t) = a_{12} \cdot C_2(t) + b_{12} \quad (2)$$

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.

Виходячи з попередніх рівнянь, тактову частоту мережевого вузла та зміщення можна використовувати для регулювання місцевого часу. Деякі схеми призначені для багаторазового регулювання зсувів вузлів або регулювання зміщення та тактової частоти до загальної шкали часу.

2.3.1 Джерела помилок синхронізації часу

Обмін повідомленнями використовується в багатьох алгоритмах синхронізації часу. Якщо один вузол відправляє пакет із позначкою часу, недетерміновані затримки, такі як час доступу та розповсюдження, ускладнюють для вузла приймача точну синхронізацію з вузлом відправника.

Загалом, наступні елементи сприяють **помилкам синхронізації** :

- *Час надсилання*: це загальний час побудови повідомлення та передачі його в мережевий інтерфейс, який потрібно надіслати. Цей час сильно залежить від використовуваних операційних систем.
- *Час доступу*: це час, необхідний для доступу до каналу. У кожній мережі використовується схема управління середнім доступом (MAC), подібна до множинного доступу з розподілом часу (TDMA), і загальний час доступу залежить від цієї схеми. Наприклад, у TDMA мережевий вузол повинен чекати, поки його слот почне передаватись, тоді як в інших схемах мережеві вузли чекають простою каналу.

- *Час поширення*: це час, необхідний для розповсюдження повідомлення по повітрю від мережевого інтерфейсу відправника до мережевого інтерфейсу приймача.
- *Час отримання*: це час, витрачений на отримання повідомлення через мережевий інтерфейс та його передачу на прикладний рівень хосту.

2.3.2 Вимоги до схем синхронізації для сенсорних мереж

При розробці алгоритму синхронізації часу обмеження бездротової мережі забезпечують виконання певних вимог, яким потрібно відповідати. Зазвичай для оцінки будь-якої техніки синхронізації використовують такі показники:

- **Точність**: Точність техніки синхронізації сильно залежить від програми.
- **Надійність**: Мережеві вузли можуть загинути або вийти з поля зору через суворе середовище, в якому вони розгорнуті. Будь-яка схема синхронізації повинна адаптуватися до таких змін у мережі та функціонувати у всіх ситуаціях.
- **Масштабованість**: У деяких додатках можуть бути розгорнуті десятки тисяч датчиків. Будь-яка техніка синхронізації повинна добре працювати з будь-якою кількістю вузлів у мережі.
- **Довговічність**: Залежно від програми, за умови, що синхронізація часу може бути миттєвою, наприклад коли певна подія трапляється або може тривати доти, доки працює мережа.
- **Енергоефективність**: Вузли мережі мають обмежені енергетичні ресурси. Усі мережеві протоколи, включаючи синхронізаційні, повинні враховувати це обмеження.
- **Вартість**: Завдяки передовим технологіям мережеві вузли стають такими маленькими та недорогими. Будь-який алгоритм синхронізації не повинен збільшувати вартість або збільшувати розмір мережевого вузла.

- Сфера застосування: Алгоритм синхронізації часу забезпечує загальний час для всіх вузлів мережі, який витрачає більше енергії та часу, або забезпечує загальний час лише для просторово закритих вузлів.
- Затримка: Багато застосувань, наприклад виявлення витoku газу, вимагають негайної реакції. Для таких типів програм загальний необхідний час для синхронізації мережі повинен бути якомога меншим.

2.4 Висновки до розділу 2:

У другому розділі було поставлено питання проблеми синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах, сформульовано і обґрунтовано важливість цього аспекту функціонування бездротових сенсорних систем. Для повноцінного застосування БСМ потрібна часова координація, з огляду на багато причин – від ефективного енергоспоживання (синхронний перехід сенсорів з режиму сну в активний режим) до успішного збору інформації (одночасний нагляд за подією декількома сенсорними вузлами) та її передачі на пункт управління тощо. Розглянуто відмінності між звичайними бездротовими мережами та БСМ та зроблено наголос на особливостях останніх, які унеможливають застосування для них звичайних способів і методів синхронізації часу. Проблема синхронізації в БСМ – дослідницька область з суттєвою науковою і практичною важливістю та має певну історією запропонованих рішень науковцями з багатьох країн світу, тож коротка історична довідка з цього приводу також присутня.

3 Аналіз алгоритмів та методів синхронізації в мобільних сенсорних мережах

3.1 Методи синхронізації для безпроводних сенсорних мереж

Визначення синхронізації часу не обов'язково означає, що всі годинники ідеально відповідають мережі. Це була б найсуворіша форма синхронізації, а також найскладніша у здійсненні. Точна синхронізація годинника не завжди необхідна, тому для задоволення власних потреб доступні протоколи від м'якого до суворого.

Існує три основних типи методів синхронізації для бездротових мереж. Перший - відносний час і є найпростішим. Це залежить від упорядкування повідомлень та подій. Основна ідея полягає в тому, щоб мати можливість визначити, чи сталася подія 1 до події 2. Порівняння місцевих годинників для визначення порядку - це все, що потрібно. Синхронізація годинника не важлива.

Наступним методом є відносний час, коли годинники мережі не залежать один від одного, а вузли відстежують дрейф та зсув. Зазвичай вузол зберігає інформацію про його дрейф та зміщення відповідно до сусідніх вузлів. Вузли мають можливість у будь-який момент синхронізувати свій місцевий час з іншими вузлами за місцевим часом. Більшість протоколів синхронізації використовують цей метод.

Останнім методом є глобальна синхронізація, де в мережі існує постійний глобальний часовий масштаб. Це, очевидно, найскладніше і найскладніше у реалізації. Дуже мало алгоритмів синхронізації використовують цей метод, особливо тому, що такий тип синхронізації зазвичай не є необхідним.

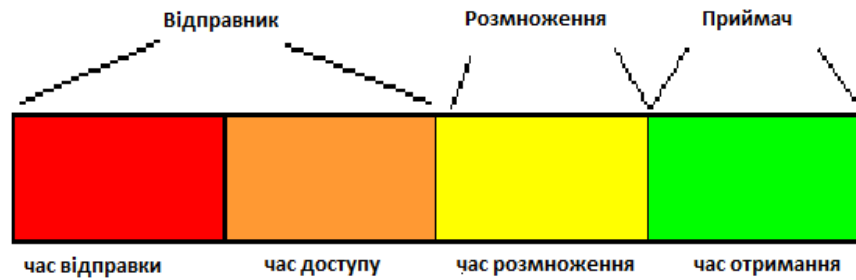


Рис 3.1. Розбивка компонентів затримки пакетів

Як показано на рис 3.1, усі схеми бездротової синхронізації мають чотири основні компоненти затримки пакетів: час надсилання, час доступу, час розповсюдження та час прийому. Час надсилання - це час відправника, який створює повідомлення про час для передачі по мережі. Час доступу - це час затримки рівня MAC при доступі до мережі. Це може чекати передачі в протоколі TDMA. Час, до якого біти передаються фізично на середовищі, вважається часом поширення. Нарешті, час прийому - це вузол прийому, який обробляє повідомлення та передає його хосту. Основна проблема синхронізації часу полягає не тільки в тому, що існує ця затримка пакета, але також може бути важко передбачити час, витрачений на кожен з них. Усунення будь-якого з них значно збільшить продуктивність техніки синхронізації.

Як показано, існує безліч різних варіантів синхронізації часу або бездротових мереж. Вони варіюються від дуже складних і важких для реалізації до більш простих і простих у реалізації. Незалежно від використовуваної схеми, усі методи синхронізації мають чотири основні компоненти: час надсилання, час доступу, час розповсюдження та час прийому.

Існує безліч протоколів синхронізації, багато з яких мало чим відрізняються один від одного. Як і в будь-якому протоколі, основна ідея завжди є, але вдосконалення недоліків - це постійне вдосконалення. Будуть

розглянуті три протоколи: Довідкова синхронізація широкомовної передачі (RBS), Протокол синхронізації синхронізації для сенсорних мереж (TPSN) та Протокол синхронізації часу наводнення (FTSP). Ці три протоколи є основними протоколами синхронізації, які зараз використовуються для бездротових мереж. Існують інші протоколи синхронізації, але ці три представляють хорошу ілюстрацію різних типів протоколів. Ці три охоплюють синхронізацію відправника до приймача, а також приймача до приймача. Крім того, вони охоплюють схеми синхронізації з одним та кількома переходами.

Схеми синхронізації спрямовані на коригування місцевого часу вузлів мережі до одного і того ж еталонного значення. Найбільш суворі та енергоємні схеми вимагають синхронізації всіх вузлів у мережі постійно (завжди увімкнено), тоді як інші більш спокійні схеми вимагають синхронізації кількох вузлів одночасно.

3.1.1 Традиційна синхронізація часу (Traditional Time Synchronization, TTS)

Традиційні схеми синхронізації мережевих вузлів, такі як Network Time Protocol (NTP), засновані на надсиланні та отриманні повідомлень. У найпростішій формі відправник передає повідомлення з поточним місцевим часом одержувачу. Потім приймач пристосовує годинник до отриманого часу. Ця схема працює, якщо затримка між надсиланням та отриманням повідомлень незначна порівняно із загальною бажаною точністю. Якщо затримка велика, вузол надсилає повідомлення, припускаючи, що одержувач миттєво відповідає; вузол може обчислити час туди-назад та використати цей час для синхронізації з іншими вузлами.

Протокол ранньої синхронізації, що використовується в Інтернет-доміні, - це Мережевий протокол часу (NTP), розроблений Mills. Клієнти NTP синхронізують свої годинники з серверами часу NTP з точністю в

порядку мілісекунд статистичний аналіз часу туди-назад. Сервери часу синхронізуються із зовнішніми джерелами часу, як правило, використовуючи GPS. NTP широко розгорнуто і виявилось ефективним, безпечним та надійним в Інтернеті. У WSN, однак, невизначеність у часі передачі, спричинена шаром радіостанції Media Access Channel (MAC) стек може ввести кілька сотень мілісекунд затримки на кожному стрибку. Тому без подальшої адаптації NTP підходить лише для WSN-програм із низькими вимогами до точності. Були й інші схеми, такі як еталонна схема мовлення, запропонована Elson et al. які усувають невизначеність відправника, видаляючи відправника з критичного шляху. Багато протоколів синхронізації часу використовують відправника для отримання синхронізації метод, при якому відправник передаватиме інформацію мітки часу, а одержувач синхронізуватиметься.

3.1.2 Довідкова синхронізація трансляції (Reference Broadcast Synchronization, RBS)

У було введено RBS, де приймач із приймачем замість відправника з приймачем використовується синхронізація. Вузли, що транслюють маяки, та інші вузли використовують час прибуття цих маяків як посилення, щоб знаходити часові зсуви між ними. Основна ідея цього алгоритму полягає у видаленні недетермінованого часу надсилання. Єдині джерела помилок у цій схемі зумовлені недетермінованістю розповсюдження та часом прийому. Помилками, спричиненими часом поширення, можна знехтувати, якщо припустити, що радіодіапазон короткий і що маяк транслюється на всі вузли в цей час. Тож час отримання - це єдине джерело помилок у цій схемі. RBS відрізняється оскільки він використовує приймач для синхронізації приймача. Ідея полягає в тому, що третя сторона передаватиме маяк усім приймачі (A і B). Маяк не містить жодної інформації про час; натомість приймачі порівнюють їх годинники (t_a і t_b) один до одного для обчислення їх

відносних зсувів фаз. Час базується на тому, коли вузол отримує контрольний маяк.

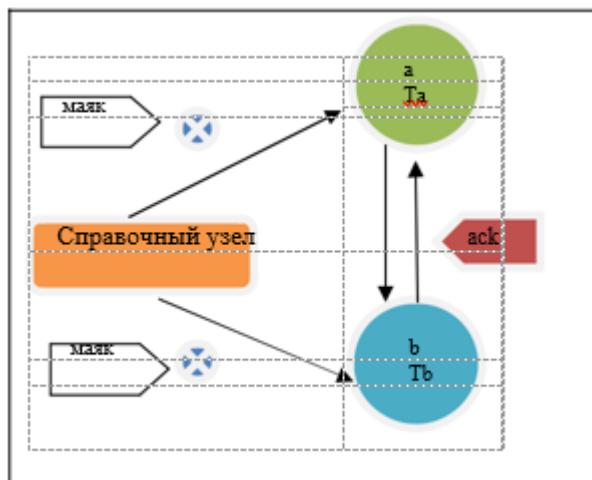


Рис 3.2 Схема RBS

Типовий сценарій зв'язку полягає в тому, що один вузол надсилає маяк своїм сусідам, і приймачі обмінюються часом отримання цього маяка, щоб знайти їх відносні часові зсуви, а отже, синхронізувати між собою. Точність цієї схеми зростає із збільшенням кількості маяків, що використовуються для синхронізації.

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.

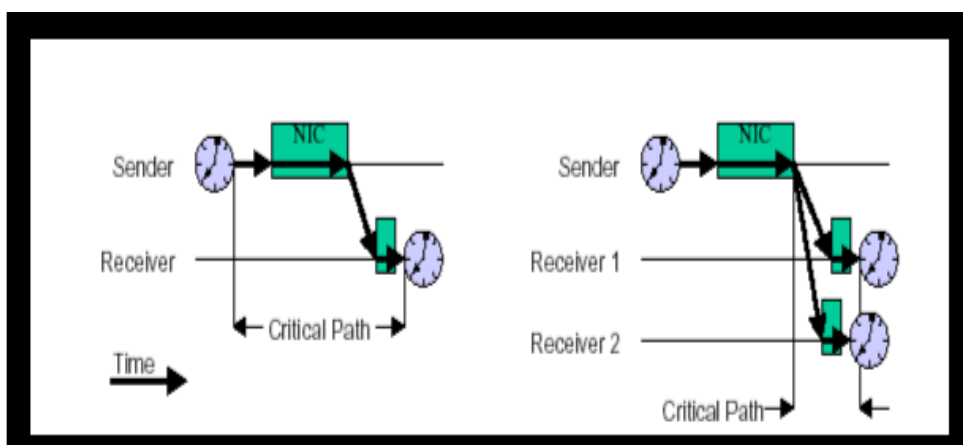


Рис. 3.3. Аналіз критичного шляху для традиційних протоколів синхронізації часу (ліворуч) та RBS (праворуч).

Головною перевагою RBS є те, що вона усуває невизначеність відправника, видаляючи відправника з критичного шляху. Видаливши відправника, єдиною невизначеністю є час розповсюдження та отримання. Час розповсюдження незначний у мережах, де діапазон відносно невеликий. Стверджується, що еталонний маяк миттєво надходить на всі приймаючі вузли. Видаляючи невизначеність відправника та розповсюдження, єдиною можливістю помилок є невизначеність приймача.

Як видно тут, критичний шлях у традиційній системі, яка є верхньою діаграмою, включає відправника. Оскільки RBS є приймачем до синхронізації приймача, відправник видаляється з критичного шляху. Критичний шлях не містить розповсюдження та невизначеність приймача. Однак, якщо діапазон передачі є відносно невеликим, тоді ми можемо усунути час поширення, і критичний шлях містить лише невизначеність приймача.

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

Ця техніка синхронізації складається з двох фаз; фаза виявлення рівня та фаза синхронізації. На фазі виявлення кожному вузлу присвоюється рівень; лише одному вузлу присвоюється рівень 0, і він називається кореневим вузлом. На другій фазі вузол рівня n синхронізується з вузлом рівня $n-1$, і до кінця цієї фази досягається загальномержева синхронізація.[16]

- *Фаза виявлення рівня:* Першим кроком на цьому рівні є вибір кореневого вузла. Вузли в мережі можуть періодично обирати цей вузол, і йому присвоюється рівень 0. Цей вузол можна підключити до зовнішнього

контрольного часу, наприклад GPS. Потім цей вузол надсилає пакети виявлення рівня, а всі сусідні вузли, які отримують цей пакет, призначають собі рівень 1. Вузли продовжують надсилати пакети, що містять їх номер та ідентифікатори, доки всі вузли в мережі не отримають рівень.

- *Фаза синхронізації:* Знову ж таки, кореневий вузол починає фазу синхронізації, надсилаючи пакет `time_sync`. Вузол А рівня n синхронізується з вузлом В рівня $n-1$ за допомогою двостороннього обміну повідомленнями. Вузол А відправляє пакет разом із місцевим часом передачі T_1 . Вузол В приймає пакет в момент часу T_2 , який можна обчислити як:

$$T_2 = T_1 + T_d + \Delta$$

Де T_d є затримкою розповсюдження, а Δ є відносним зміщенням тактової частоти між вузлами, і обидва вважаються постійними протягом часу обміну повідомленнями. Вузол В чекає випадковий час і відповідає назад на вузол А через пакет підтвердження в момент T_3 , який включає значення T_1 , T_2 , T_3 і номер його рівня. Як тільки вузол А отримає цей пакет в T_4 , він може обчислити Δ і T_d наступним чином [6] і синхронізуватися з вузлом В.

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}; \quad T_d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (4)$$

Цей метод синхронізації всіх вузлів на рівні n до вузлів на рівні $n-1$ триває до тих пір, поки всі вузли в мережі не синхронізуються.

Процес синхронізації знову ініціюється кореневим вузлом. Він транслює пакет `time_sync` до вузлів першого рівня. Ці вузли чекатимуть випадкову кількість часу перед тим, як розпочати двосторонній обмін повідомленнями. Кореневий вузол надішле підтвердження, а вузли першого рівня налаштують свої годинники для синхронізації з кореневими вузлами.

Вузол другого рівня зможе почути зв'язок між вузлами першого рівня, оскільки принаймні один вузол одного рівня є сусідом вузла другого рівня.

Почувши цей зв'язок, вузли другого рівня будуть чекати випадковий проміжок часу, перш ніж розпочати двосторонній обмін повідомленнями з вузлами першого рівня. Цей процес триватиме доти, доки всі вузли не синхронізуються з кореневим вузлом.

Знову процес синхронізації виконується приблизно так само, як і фаза виявлення рівня. Вся комунікація починається з кореневого вузла, що транслює інформацію до вузлів рівня 1. Цей зв'язок поширюється по дереву, доки всі вузли рівня $i-1$ не синхронізуються з вузлами рівня i . На цьому етапі всі вузли будуть синхронізовані з кореневим вузлом.

Будь-який пакет синхронізації має чотири розглянуті раніше затримки: час надсилання, час доступу, час розповсюдження та час прийому. Усунення будь-якого з них було б плюсом. Хоча TPSN не усуває невизначеність відправника, він, однак, мінімізує її. Крім того, TPSN розроблений як багатопроцесорний протокол; тому дальність передачі не є проблемою.

На відміну від RBS, TPSN має невизначеність у відправника. Вони намагаються зменшити цю недетермінованість шляхом штампування часу пакетів на рівні MAC. Стверджується, що невизначеність відправника дуже мало сприяє загальній помилці синхронізації. Шляхом зменшення невизначеності з низьким рівнем часу для штампування стверджується, що TPSN має точність на 2 до 1 кращу, ніж RBS, і що синхронізація відправника до приймача перевершує синхронізацію від приймача до приймача. RBS також обмежений діапазоном передачі. Було зазначено, що RBS може ігнорувати час поширення, якщо діапазон передачі був відносно малим. Якщо це велика мульти-хоп мережа, це не так. RBS довелося б надіслати більше еталонних маяків для синхронізації вузла. TPSN, з іншого боку, був розроблений для багатокористувацьких мереж. Їхній протокол використовує схему, засновану на дереві, тому інформація про час може точно розповсюджуватися по мережі.

Заявляється, що метод синхронізації відправника до приймача є більш точним, ніж синхронізація приймача до приймача. Також TPSN розроблений для мульти-хоп мереж, де RBS найкраще працює в мережах з одним хопом. Отже, діапазон передачі не є фактором для TPSN. Що стосується енергії, TPSN має більше накладних витрат, ніж RBS. Пакети, надіслані для вибору кореневого вузла, і ті, що надіслані на фазі виявлення рівня, вважаються накладними витратами. Цей вид накладних витрат скорочує термін служби мережі, особливо якщо кореневі вузли так часто гинуть у мережі, і весь метод синхронізації повинен бути повторений.

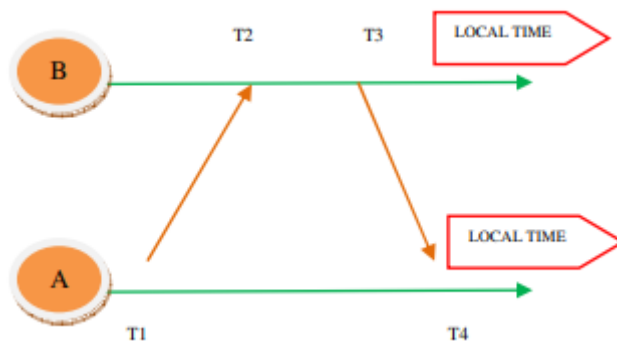


Рис 3.4 Двосторонній обмін повідомленнями

Рис 3.4 ілюструє двосторонній обмін повідомленнями між парою вузлів. Це повідомлення може синхронізувати пару вузлів, дотримуючись цього методу. Часи T1, T2, T3 і T4 - це всі вимірювані рази. Вузол А надіслав пакет синхронізації_імпульсу в момент T1 на Вузол В. Цей пакет буде містити рівень Вузла А і час T1, коли він був відправлений. Вузол В отримає пакет в момент часу T2. Час T3 - це час, коли Вузол В відправляє пакет підтвердження_на Вузол А. Цей пакет буде містити номер рівня Вузла В, а також рази T1, T2 і T3. Знаючи дрейф, Вузол А може виправити свій годинник і успішно синхронізуватися з Вузлом В. Це основний зв'язок для TPSN.

Вузол другого рівня зможе почути зв'язок між вузлами першого рівня, оскільки принаймні один вузол одного рівня є сусідом вузла другого рівня.

Почувши цей зв'язок, вузли другого рівня будуть чекати випадковий проміжок часу, перш ніж розпочати двосторонній обмін повідомленнями з вузлами першого рівня. Цей процес триватиме доти, доки всі вузли не синхронізуються з кореневим вузлом. Знову процес синхронізації виконується приблизно так само, як і фаза виявлення рівня. Вся комунікація починається з кореневого вузла, що транслює інформацію до вузлів рівня 1. Цей зв'язок поширюється по дереву, доки всі вузли рівня $i-1$ не синхронізуються з вузлами рівня i . На цьому етапі всі вузли будуть синхронізовані з кореневим вузлом

3.1.4 Tiny-Sync та Mini-Sync

У роботі пропонується два простих алгоритми для синхронізації пари бездротових вузлів. Потім ці алгоритми розширюються для синхронізації цілих вузлів мережі. Традиційний двосторонній обмін повідомленнями використовується для збору точок даних, які використовуються для накладання жорстких меж відносного дрейфу та відносного зміщення між двома вузлами. Для створення точки даних за допомогою двох вузлів; 1 і 2, вузол 1 надсилає повідомлення зонда з позначкою часу t_0 . Вузол 2 відмічає отримане повідомлення за допомогою t_b і відсилає підтвердження до вузла 1, негайно або через деякий час, який відмічає це підтвердження за допомогою t_r . Рисунок 3.5 показує описану послідовність. [16]

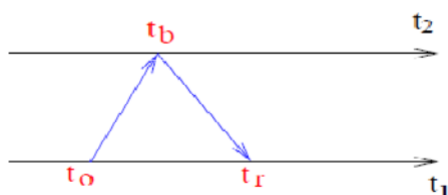


Рис. 3.5 Обмін зондуючими повідомленнями.

Виходячи з рівняння 2 вище та беручи до уваги порядок переданих повідомлень, повинні існувати такі залежності:

$$t_o(t) < a_{12}t_b(t) + b_{12} \quad (5)$$

$$t_r(t) > a_{12}t_b(t) + b_{12} \quad (6)$$

Алгоритми починають збирати точки даних, використовуючи лінійне програмування для оцінки a_{12} і b_{12} , і синхронізувати вузли між собою. Хоча звичайні пакети даних та підтвердження в мережі можуть використовуватися для збору точок даних, що зменшує накладні витрати, оцінюючи a_{12} та b_{12} , потрібно велике сховище та важкі обчислення.

3.1.5. Алгоритми синхронізації на основі дерева

Деякі бездротові сенсорні мережі потребують точності в порядку мікросекунд, тоді як іншим вона потрібна в порядку мілісекунд. Алгоритми, мають справу з цим фактом, припускаючи, що задана точність, а отже, складність та обчислювальний час залежать від цього заданого значення.

Перший алгоритм складається з двох фаз; обшивне дерево будується в першій фазі. Потім синхронізація відправника до приймача виконується вздовж $n-1$ країв охоплюючого дерева у фазі два. У цьому централізованому алгоритмі всі вузли синхронізуються з центральним, який називається раковиною або кореневим вузлом. Кореневий вузол відповідає за ініціювання фази синхронізації, коли це потрібно. Крім того, він встановлює загальний час синхронізації всієї мережі. Необхідно періодично оновлювати кореневий вузол з глибиною охоплюючого дерева, щоб він міг приймати ці обчислення та інші рішення.

У другому алгоритмі вузли вирішують, коли їх потрібно синхронізувати, виходячи з їх відстані від еталонного вузла, дрейфу годинника та необхідної точності. Отже, будь-який вузол у мережі може ініціювати фазу синхронізації з опорною точкою, і всі вузли вздовж шляху до

цієї контрольної точки повинні бути спочатку синхронізовані. Оскільки деякі вузли не потребують постійної синхронізації, цей алгоритм усуває накладні витрати на непотрібну синхронізацію, дозволяючи вузлам приймати рішення. Агрегація запитів на синхронізацію використовується, щоб зробити цей алгоритм більш ефективним. Перш ніж вузол надсилає запити на синхронізацію, він перевіряє у своїх сусідів, чи не очікується будь-який запит, якщо такий є, він додасть свій запит до очікуваного, тому шлях буде синхронізований лише один раз.

У роботі запропонований алгоритм розділяє всю мережу на піддерева. У кожному піддереві діти синхронізуються зі своїм батьківським або кореневим вузлом. Потім усі батьки синхронізуються між собою.

Ми виявили, що RBS та TPSN працюють дуже добре з точки зору точності. Точність їх становить кілька мікросекунд. Оскільки надсилання та отримання пакетів є найбільш енергоємним завданням при синхронізації мережі, кількість пакетів, необхідних для синхронізації пари вузлів, може бути використана для оцінки енергоефективності.

У RBS, який є алгоритмом від приймача до приймача, 4 пакети надіслані та 3 пакети отримані для синхронізації двох вузлів. У TPSN 2 відправлені та 2 отримані пакети для синхронізації двох вузлів. Незважаючи на те, що TPSN звучить більш енергоефективно, той факт, що для виявлення рівня в TPSN потрібні додаткові відправлені та отримані пакети, і той факт, що більше ніж один приймач може синхронізуватися в одному імпульсі в RBS. Деревовидні алгоритми синхронізації гнучкі, і на основі заданої точності складність може бути як високою, так і низькою. Кореневий вузол відіграє головну роль у цих алгоритмах і може бути підключений до зовнішніх вузлів, щоб отримати реальний час життя. обчислити зміщення. Цього достатньо для збереження місцевого часового масштабу.

RBS можна розширити від найпростішої форми однієї трансляції та двох приймачів до синхронізації між n приймачами, де n більше двох. Для

цього може знадобитися надсилання більше однієї трансляції. Збільшення трансляцій збільшить точність синхронізації.

RBS відрізняється від традиційної синхронізації відправника до приймача, використовуючи синхронізацію від приймача до приймача. Еталонний маяк транслюється по всіх вузлах. Після отримання приймачі відзначають свій місцевий час, а потім обмінюються інформацією про синхронізацію з сусідніми вузлами. Тоді вузли зможуть обчислити їх зміщення.

3.1.6. Протокол синхронізації часу затоплення

Іншою формою синхронізації відправника до одержувача є FTSP. Цей протокол схожий на TPSN, але покращує недоліки TPSN. Подібне в тому, що він має структуру з кореневим вузлом і що всі вузли синхронізовані з коренем.

Кореневий вузол передаватиме інформацію про синхронізацію часу з одним радіо повідомленням до всіх приймаючих приймачів. Повідомлення містить відмітку часу глобального часу при передачі відправника. Приймач відмічає місцевий час при отриманні повідомлення. Отримавши як час передачі відправника, так і час прийому, одержувач може оцінити зміщення годинника. Повідомлення має штапований час рівня MAC, як у TPSN, як на стороні, що надсилає, так і на приймачі. Для збереження високої точності необхідна компенсація відхилення годинника. Для цього FTSP використовує лінійну регресію.

FTSP був розроблений для великих багатокористувацьких мереж. Корінь обирається динамічно і періодично переобирається і відповідає за збереження глобального часу мережі. Приймаючі вузли синхронізуються з

кореневим вузлом і організуються спеціально для передачі інформації про час між усіма вузлами. Структура мережі - це топологія сітчастого типу замість топології дерева, як у TPSN

Переваги FTSP

FTSP має кілька переваг, які він покращив порівняно з TPSN. Незважаючи на те, що TPSN забезпечував протокол для багатокористувацької мережі, він погано обробляв зміни топології. TPSN доведеться поновити фазу виявлення рівня, якщо змінився кореневий вузол або змінилася топологія. Це призведе до збільшення мережевого трафіку та створення додаткових накладних витрат.

FTSP надійний у тому, що використовує переповнення повідомлень синхронізації для боротьби з несправністю каналів та вузлів. Затоплення також забезпечує можливість динамічних змін топології. Протокол визначає, що кореневий вузол буде періодично перевибиратися, тому необхідна динамічна топологія. Як і TPSN, FTSP також забезпечує штампування часу рівня MAC, що значно підвищує точність і зменшує тремтіння. Це усуне всі помилки, крім часу поширення. Він використовує множинні часові штампування та лінійну регресію для оцінки дрейфу та зміщення годинника.

Пакети даних, передані за допомогою FTSP, будуються. Існує преамбула, потім байти синхронізації, за якими йдуть дані, а потім нарешті CRC. Пунктирними лініями на малюнку вказані фактичні байти в пакеті, а суцільною лінією - байти в буфері. Коли відправник передає байти преамбули, приймач пристосовується до несучої частоти. Після отримання бітів синхронізації приймач може обчислити бітове зміщення, необхідне для точного відтворення повідомлення. Мітки часу розташовані на межі байтів синхронізації.

Основні переваги FTSP - можливість динамічних змін топології, надійність для відмов вузлів та ліній зв'язку та штампування часу рівня MAC для точності. Він забезпечує протокол затоплення з низькою пропускнуою

здатністю, щоб забезпечити мережеву синхронізацію, де всі вузли синхронізовані з кореневим вузлом.

3.2 Споживання енергії схем синхронізації

Більшість бездротових сенсорних мереж на сьогоднішній день використовують вузли з обмеженими можливостями живлення, обробки, зберігання та зв'язку. Крім того, вони, як правило, включають порівняно прості датчики (наприклад, світло, температуру, тиск, магнітометр тощо). У цих розгортаннях енергія, що споживається завданнями зондування, є відносно низькою, що означає, що підсистема зв'язку (тобто радіо) домінує у споживанні енергії. RBS і TPSN забезпечують точну синхронізацію годинника протягом декількох мікросекунд невизначеності. Однак вони обидва розроблені для мереж з невеликою кількістю датчиків і спеціально не спрямовані на енергозбереження; хоча ці алгоритми будуть працювати для великих мереж, їх споживання енергії стає неефективним, а мережеве підключення не підтримується, як тільки вузли починають втрачати потужність. Моделювання кожного з цих методів показує, що синхронізація великої сенсорної мережі вимагає надмірно великої кількості передач, що швидко виснажує датчики та зменшить зону покриття мережі. Гібридний алгоритм вибирає RBS над TPSN на основі порогу приймача та кількості приймачів.

Результати з таблиці 3.1. показують, що споживання енергії RBS більше залежить від щільності датчиків у певній області. На відміну від цього, TPSN та гібридний алгоритм менше впливають на розмір мережі. Коли розмір мережі збільшується з 250 датчиків до 500 датчиків (для тієї ж площі 1 км²), RBS стає менш енергоефективним, ніж TPSN. Гібридний алгоритм перевершує TPSN на 15,7%, тоді як RBS - на 20,8%. Як тільки мережа збільшується до 750 датчиків, RBS явно стає менш ефективною, ніж TPSN. Гібридний алгоритм все ще перевершує TPSN на 12,7%. Оскільки RBS

споживає більше енергії, гібридний алгоритм зараз перевершує його на 32%. Гібридний алгоритм, зменшення потужності є ще більш різким у великих мережах сенсорних мульти-стрибків. Метод також вдосконалює ці алгоритми, підтримуючи велику зону покриття, навіть коли деякі датчики втрачають потужність. Будь ласка, дивіться таблицю 3.1 щодо економії енергії в діапазоні міліВт без використання датчиків. Для платформи MICA2Dot прийом використовує приблизно 24 мВт потужності, тоді як для передачі потрібно 75 мВт при -5 дБм.

ТАБЛИЦЯ 3.1.

Середнє споживання енергії (мВт) в rbs, tpsn і гібридних способах синхронізації

Датчики	250	500	750	1000	1250	1500
RBS	466	1046	1844	2762	3756	5060
TPSN	511	983	1434	1885	2331	2770
Гібридний	404	828	1253	1672	2095	2514
Savings over RBS	9.29%	20.8%	32.0%	39.4%	44.2%	50.3%
Savings over TPSN	20.8%	15.7%	12.7%	11.2%	10.1%	9.2%

3.3 Оцінка алгоритмів синхронізації часу

Корисність або доступність сенсорної мережі створюється для задоволення потреб запитів користувачів шляхом об'єднання даних кожного датчика для отримання єдиного результату. Для виконання цього завдання стає необхідним для цих датчиків узгодити таку концепцію, як час. Всі активні датчики (учасники) можуть бути обгорнуті загальним масштабом часу або синхронізацією локальних годинників у кожному датчику, або шляхом передачі штампування. Далі представлено порівняння різних алгоритмів синхронізації часу для WSN на основі різних основних факторів, таких як точність, енергоефективність, мобільність та складність.

- **Енергоефективність:** це неявна вимога в більшості бездротових мереж, в яких це зобов'язання повинно виконуватися і змінюватися залежно від попиту. Наприклад, у випадку сенсорних мереж ця вимога суворо примушує вузли спати якомога частіше і суворо обмежує енергію, доступну для синхронізації та інших завдань. Основною причиною цього обмеження є невеликий розмір датчиків батарей. Це обмежує кількість виробленої та накопиченої енергії.

- **Точність:** Точність - це міра того, як час, який підтримується в мережі, підтверджується стандартним часом. Іншими словами, це міра точності синхронізації. Протокол з високою точністю забезпечує високу точність у випадку абсолютної точності. Це означає, що час, синхронізований в мережі, не сильно відхиляється від зовнішнього посилення (наприклад, UTC). У разі відносної точності означає, коли синхронізований набір вузлів вважається максимальним відхиленням тактового вузла, набір якого відносно малий.

- **Складність обчислень:** бездротові мережі часто мають обмежені фізичні можливості та енергетичні обмеження. Отже, складність протоколу синхронізації може застосовувати практичний протокол для багатьох додатків, коли ми розрізняємо обчислювальну складність протоколу (для

такого виконання та вимог пам'яті) та складність повідомлень (кількість повідомлень, якими обмінюються під час синхронізації).

- Мобільні мережі: У мобільній мережі датчики мають можливість рухатися, і вони з'єднуються з іншими датчиками лише при вході в географічну область цих датчиків. Область мобільного датчика - це комунікаційний діапазон, до якого він може успішно спілкуватися та обмінюватися повідомленнями з іншими датчиками. Зміна топології часто є проблемою, оскільки вимагає повторної синхронізації вузлів та перерахунку околиць або кластерів.

Таблиця 3.2

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
Miny-Sync	Високий	Ні	Низька	Висока
SLTP	Високий	Так	Середня	Висока
TDP	Середній	Так	Висока	Висока

3.4 Класифікація протоколів синхронізації часу

В ідеальному випадку протокол синхронізації часу повинен працювати оптимально з точки зору всіх висунутих вимог, пов'язаних з тимчасовою синхронізацією в БСМ, які включають в себе енергоефективність, масштабованість, точність, безпеку, надійність. Однак складний характер БСМ дуже ускладнює оптимізацію протоколу щодо всіх цих вимог одночасно. Через компроміси в задоволенні цих вимог кожен протокол призначений для того, щоб чітко розрізняти різні вимоги.

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

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

3.4.1 Концепції забезпечення синхронізації

Бездротоові сенсорні мережі надають відповіді на запити користувачів шляхом злиття даних з кожного датчика для формування єдиної відповіді або результату. Для досягнення цієї мети необхідно, щоб ці датчики погодили загальне поняття часу. Всі датчики, що беруть участь, можуть бути поєднані загальною шкалою часу або шляхом синхронізації локальних годинників в кожному датчику, або шляхом простого переказу тимчасових міток, які надходять на датчик в локальний годинник. В даний час описані різні варіанти.

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

Підпорядкована (Master-slave). Протокол ведучий-ведений призначає один вузол в якості ведучого, а інші вузли - в якості ведених. Ведені вузли розглядають локальне зчитування годин ведучого в якості опорного часу і

намагаються синхронізуватись з ведучим. Загалом, головний вузол вимагає ресурсів процесора, пропорційних кількості підлеглих пристроїв, а вузлом з потужними процесорами або більш легкими навантаженнями призначається головний вузол. Mock et al. [18] взяли протокол синхронізації годин IEEE 802.11 через свою просту, не надмірну структуру ведучого/веденого. Протокол Ping [19] також дотримується режиму ведучий-ведений.

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

- Корекція годинників в порівнянні з некерованими годинниками

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

Некеровані годинники. Досягнення загального поняття часу без синхронізації стає популярним, тому що завдяки цьому підходу можна зберегти значну кількість енергії. Кожен вузол підтримує свій власний годинник, як є, і зберігає таблицю переведення часу, яка пов'язує його годинник з годинниками інших вузлів; таким чином, замість постійного оновлення свого годинника кожен вузол перетворює інформацію про час в пакети даних, що надходять від інших вузлів, у свій власний годинник,

використовуючи таблицю перетворення часу. Місцеві мітки часу порівнюються з використанням таблиці. Таким чином, підтримується глобальний масштаб часу, дозволяючи годинникам працювати без прив'язки. Коли мітки часу обмінюються між вузлами, вони перетворюються в локальні значення годинників приймаючого вузла. Враховуються затримки проходження між двома вузлами і час простою повідомлення. RBS та Romer використовують цей принцип.

- Внутрішня синхронізація в порівнянні з зовнішньою синхронізацією

Внутрішня синхронізація. Внутрішня синхронізація означає, що годинники всіх вузлів синхронізуються один з одним, без підтримки зовнішніх системних годинників. Метою внутрішньої синхронізації є отримання узгодженого уявлення про час на всіх вузлах в мережі, навіть якщо цей час може відрізнятися від будь-яких зовнішніх опорних точок відліку часу. Зовнішня синхронізація забезпечує як синхронізацію із зовнішнім джерелом, так і узгодженість між усіма годинниками в мережі. Коли вузли в мережі синхронізовані з зовнішнім системним годинником, точність годинника означає його максимальне зміщення щодо системного годинника. Коли вузли в мережі синхронізовані внутрішньо, точність вказує максимальне зміщення між будь-якими двома годинниками в мережі (Kopetz 1997). Відзначимо, що якщо два вузли синхронізовані зовні з точністю Δ , вони також синхронізовані внутрішньо з точністю 2Δ .

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

Зовнішня синхронізація. Зовнішня синхронізація означає, що годинники всіх вузлів синхронізуються з зовнішнім джерелом часу (або системним годинником). Зовнішній системний годинник синхронізується з точним стандартом реального часу, таким як всесвітній координований час (Universal

Coordinated Time, UTC). Місцеві годинники датчиків прагнуть налаштувати цей опорний час для синхронізації. Такі протоколи, як NTP, синхронізуються таким чином, тому що зовнішня синхронізація краще підходить для слабкозв'язаних мереж, таких як Інтернет. Більшість протоколів у сенсорних мережах датчиків не виконують зовнішню синхронізацію, якщо додаток не вимагає цього, тому що енергоефективність є першочерговим завданням, і використання зовнішнього джерела часу зазвичай призводить до високих потреб в енергії.

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

- **Імовірнісна і детермінована синхронізація**

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

Детермінована синхронізація. Arvind визначає детерміновані алгоритми як ті, які гарантують верхню межу зміщення годинників з упевненістю. Більшість алгоритмів в літературі є детермінованими. Протокол

Sichitiu і Veerarittiphan [24] зосереджений на детермінованому алгоритмі. RBS і протокол дифузії часу [22] також детерміновані.

- Передавач-приймач синхронізація проти приймач-приймач синхронізації

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

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

1. Вузол передавача періодично відправляє повідомлення з його місцевим часом в якості мітки часу для одержувача.

2. Потім приймач синхронізується з передавачем, використовуючи мітку часу, яку він отримує від відправника.

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

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

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

- Попарна синхронізація в порівнянні з загальносистемною синхронізацією

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

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

Таблиця 3.3

Класифікація концепцій забезпечення синхронізації

Протокол	Велучий-ведений чи рівноправна	Завнішня чи внутрішня	Детермінована чи ймовірнісна	Передавач-приймач (SRS) чи приймач-приймач (RRS)	Корекція годинників
RBS	Рівноправна	Обидві	Детермінована	RRS	Ні
Romer	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Ні
Mock et al.	Велучий-ведений	Внутрішня	Детермінована	RRS	Так
Ganeriwal et al.	Велучий-ведений	Обидві	Детермінована	SRS	Так
Ping	Велучий-ведений	Обидві	Детермінована	SRS	Так

PalChaudhuri et al.	Рівноправна	Обидві	Ймовірнісна	RRS	Ні
Sichitiu and Veerarittiphan	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Так
Time-diffusion protocol	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	RRS	Так
Asynchronous diffusion	Рівноправна	Внутрішня	Детермінована	SRS	Так

3.4.2 Способи синхронізації відповідно до особливостей мереж

- Однострибкові і багатострибкові мережі

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

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

- Стаціонарні і мобільні мережі

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

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

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

• Підхід на основі MAC-рівня і стандартний підхід

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

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

- Запобігання колізій передачі, щоб передача сполучення між одним відправником і передбачуваним вузлом (-ами) приймача не заважала передачі іншими вузлами. Протоколи MAC ефективно використовують рівень MAC для досягнення більш високої енергоефективності, що має вирішальне значення для мереж датчиків. Широко використовується протокол MAC

IEEE 802.11. Кілька варіантів цього протоколу були визначені з метою контролю споживання енергії, включаючи протоколи, перераховані нижче.

- S-MAC (датчик-MAC)
- PAMAS (протокол багатокористувацького доступу)
- EC-MAC (енергозберігаючий MAC)
- PRMA (MAC з багатокористувацьким доступом з резервуванням пакетів)
- DQRUMA (Розподілений запит на обслуговування черги множинного доступу)
- MDR-TDMA (мультисервісний динамічний резервний TDMA).

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

Таблиця 3.4 класифікує різні протоколи синхронізації годин на основі аналізу в цьому розділі.

Таблиця 3.4

Класифікація способів синхр. відповідно до особливостей мереж

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

3.5 Висновок до розділу 3

У всіх бездротових мережах основною проблемою для протоколів синхронізації є розбіжності між часом надсилання, часом доступу, часом поширення та часом прийому. Виключення або можливість точного передбачення будь-якого з них значно підвищує ефективність протоколу синхронізації. Обговорення RBS, TPSN та FTSP було забезпечене перевагами кожного протоколу. Нарешті було представлено промисловий випадок та детально подано протокол.

RBS - це ширококомовний протокол, що використовує синхронізацію приймача з приймачем. Призначений кореневий вузол буде транслювати маяк. Кілька вузлів приймають маяк одночасно. Потім приймачі зазначали місцевий час після прийому, а потім порівнювали з сусідніми вузлами. З цього вони змогли б розрахувати свій фазовий зсув. Головна перевага полягає в тому, що цей протокол усуває невідповідність відправника. Основним недоліком є те, що він не був розроблений для великих багатокористувацьких мереж.

Далі був TPSN, який був відправником для синхронізації приймача. Цей протокол має дві основні фази, фазу виявлення рівня та фазу синхронізації. На етапі виявлення рівня кожному вузлу присвоюється рівень, причому кореневий вузол є єдиним вузлом на нульовому рівні. Далі йде фаза синхронізації, де вузли на рівні один ініціюють двосторонні повідомлення з кореневим вузлом. Цей процес поширюватиметься по всій мережі. Обидві фази ініціюються з кореневого вузла. Основною перевагою цього є те, що він забезпечує покращення точності від 2 до 1. Основним недоліком було те, що він не дозволяв динамічних змін топології.

Остаточним обговорюваним протоколом був FTSP, який був ще одним протоколом синхронізації відправника. FTSP передає інформацію про синхронізацію всім вузлам, які можуть приймати повідомлення. Ці вузли, в свою чергу, обчислюватимуть відстань від глобального часу. Приймаючий

вузол також обчислює перекіс годинника за допомогою лінійної регресії. Основна перевага полягає в тому, що він надійно компенсує збої в роботі вузлів і каналів. Це також забезпечує динамічну топологію. .

Ці протоколи були розроблені з урахуванням продуктивності та не враховували безпеки. Було показано, що можливі атаки синхронізації на всіх цих протоколах. Контрзаходом, який обговорювали, були автентифікація, резервування та відмова передавати інформацію про корумповані терміни. .

Нарешті було представлено галузевий випадок, коли шведська установа автоматизації використовує сенсорну мережу ZigBee і потребує енергоефективного алгоритму синхронізації. Вони розробили власний алгоритм, але він працював майже так само, як TPSN. Вузол концентратора запускав синхронізацію і передавав повідомлення одним стрибком. Потім приймаючий вузол, у свою чергу, повторно проводить передачу повідомлення. Вузли переходять у режим сну з низьким енергоспоживанням для економії енергії.

ВИСНОВКИ

В останні роки велику увагу зосереджують саме на бездротових сенсорних мережах, оскільки вони мають широке застосування в різних областях життєдіяльності людини. Серед великої кількості складнощів при проектуванні і створенні таких мереж основною проблемою є синхронізація годинників між сенсорними вузлами. Надання загальної тимчасової осі необхідно для великої кількості додатків для датчиків, тому що дані, які вони повідомляють, повинні бути сфокусовані і точні, щоб надати повну картину об'єкта, події або середовища, за яким ведеться спостереження. Традиційні алгоритми синхронізації годинників для дротових мереж не можуть використовуватися, оскільки бездротові мережеві протоколи датчиків вимагають динамічної адаптації, здатності керувати мобільністю датчиків і масштабованістю. При цьому датчики досить обмежені ресурсами через обмежену потужність акумулятора, зарядити який по мірі розрядження або замінити часто буває неможливо в силу сфери застосування БСМ (часто це важкодоступні зони). Крім того, їм необхідно працювати в умовах високих втрат і ненадійності. В результаті цього на даний момент активно створюються та розвиваються протоколи синхронізації для бездротових сенсорних мереж.

У даній роботі було поставлено питання важливості проведення синхронізації, обмежень, притаманних БСМ у синхронізації, розглянуті фундаментальні підходи та принципи забезпечення синхронізації.

Наведено класифікації протоколів синхронізації часу в БСМ по різним ознакам. Представлено огляд і аналіз існуючих тактових протоколів синхронізації для бездротових сенсорних мереж на основі багатьох чинників, включаючи точність, надійність, енергоефективність, складність; виділено їх переваги та недоліки. В результаті розгляду бачимо, що оптимальних для

всіх випадків способів синхронізації не існує, застосовуються компромісні рішення, залежно від характеристик і умов використання БСМ.

ПЕРЕЛІК 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. 6LoWPAN Sub1GHz Evaluation kit. Texas Instruments. Available from:
www.ti.com/tool/CC-6LOWPANDK-868

13. HUI, J., CULLER, D. and CHAKRABARTI, S. 6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into IP architecture. IPSO, Industrial Ethernet Book Issue 59, 1997. Available from:
<http://www.iebmedia.com/index.php?id=7176&parentid=63&themeid=255&hft=59&showdetail=true&bb=1&PHPSESSID=a3tc6d9vhs5ab6svu8ahcb4c10>

14. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008.-328с.,іл.

15. Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: НПП “Издательство”Наукова думка” НАН Украины”, 2008.– 580 с.

16. Синявіна, Є. П. (2021). СИНХРОНІЗАЦІЯ ЧАСУ В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*, 328–330. вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/231326>

17. 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

18. 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

19. Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети с сверхширокополосными импульсными радиосигналами. – Киев, Наукова Думка, 2012

20. J. Elson, L. Girod, and D. Estrin. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. *Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002)*, Vol 36, pp. 147–163, 2002.

21. S. PalChaudhuri, A. Saha, and D. B. Johnson. Probabilistic Clock Synchronization Service in Sensor Networks. Technical Report TR 03-418, Department of Computer Science, Rice University, 2003.

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

23. Q. Li and D. Rus. Global Clock Synchronization in Sensor Networks, *Proc. IEEE Conf. Computer Communications (INFOCOM 2004)*, Vol. 1, pp. 564–574, Hong Kong, China, Mar. 2004.

24. M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003)*, pp. 1266–1273, 2003.

25. J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, 2009

26. R. Fan and N. Lynch. Gradient Clock Synchronization, 2006

27. Fengyuan Gong; Mihail L. Sichitiu. On the Accuracy of Pairwise Time

Synchronization, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017

Pages: 2664 – 2677.

28. Ali Al-Shaikhi; Ahmad Masoud. Efficient, Single Hop Time Synchronization Protocol for Randomly Connected WSNs IEEE Wireless Communications Letters , 2017, Pages: 170 – 173.