

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК
(підпис) (Ім'я, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування
інфокомунікацій.

на тему: _____

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ТЗ - 91 мп
(шифр групи)

Бандушкін Дмитро Андрійович _____ (підпис)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник Лисенко Олександр Іванович _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант _____ (підпис)
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рецензент _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

Студент _____ (підпис)

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

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

Спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту
Бандушкіну Дмитру Андрійовичу

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

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

затверджені наказом по університету від «03» « листопада » 2020 р. № 3208-с

2. Строк подання студентом дисертації 11.12.20 _____

3. Об'єкт дослідження: безпроводові сенсорні мережі.

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

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

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

2) Аналіз існуючих методів синхронізації вузлів безпроводових сенсорних мереж.

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

4) Модулювання системи БСМ.

5) СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ПРИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГОДИННИКІВ

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук та опрацювання літератури з теми наукового дослідження.	01.11.2019 - 09.06.2020	
2	Розгляд та детальне вивчення основних принципів побудови та функціонування безпроводових сенсорних систем. Огляд сучасних матеріалів та публікацій по результатам наукових досліджень в даній сфері.	01.12.2019 - 15.12.2019	
3	Знаходження шляхів підвищення ефективності синхронізації часу в безпроводових сенсорних мережах.	02.04.2020 - 16.04.2020	
4	Написання розділу «ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ»	10.06.2020 – 20.07.2020	
5	Написання розділу «СИНХРОНІЗАЦІЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ»	21.07.2020 – 25.08.2020	
6	Написання розділу «МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ»	26.08.2020 – 17.10.2020	
7	Написання розділу «СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ПРИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГОДИННИКІВ»	18.10.2020 – 02.12.2020	
8	Написання розділу «Стартап» та підбиття підсумків, оформлення та редагування розділів роботи.	03.12.2020 – 12.12.2020	

Студент

(підпис)

Бандушкін Д.А.

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Лисенко О. І.

РЕФЕРАТ

Робота містить ? сторінок, ? рисунків, ? таблиці. Було використано ? джерел.

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

У статті розглядаються унікальні особливості БСМ, які унеможливають використання протоколів синхронізації, що використовуються у стандартних бездротових мережах; розглядає основні підходи, що використовуються як основа для розробки та впровадження нових технологій та алгоритмів синхронізації. Наведені вимоги, яким повинні відповідати протоколи синхронізації.

Запропоновано та вдосконалено метод точної синхронізації на основі швидких та повільних локальних годинників.

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

Зміст

Перелік скорочень

Вступ

1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Огляд БСМ.

1.2 Застосування бездротової сенсорної мережі

1.3 Проблеми проектування бездротової сенсорної мережі

1.4 Структура бездротової сенсорної мережі

1.4.1 Зіркова мережа (одна точка-багатоточка)

1.4.2 Мережева топологія

1.4.3 Гібридна Зірка - Мережа топологія

1.5 Структура бездротового вузла датчика

1.6 Структура зв'язку бездротової сенсорної мережі

1.7 Висновок до першого розділу

2. СИНХРОНІЗАЦІЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Синхронізація та проблеми синхронізації

2.2 Значення синхронізації

2.3. Потреби синхронізації в БСМ

2.3.1. Враховуючи вплив умов зовні

2.3.2. Проблеми пов'язані з обмеженим електроживленням

2.3.3. Безпроводовість та мобільність сенсорних мереж

2.3.4. Технічні обмеження

2.4 Висновки до розділу 2

3. Моделювання системи

3.1 Часова модель

3.2. Затримка синхронізації в БСМ

3.3 Модель стану синхронізації годинника

3.4. Модель синхронізації, заснована на контролі

3.5 Модель синхронізації з втратою пакетів

3.6 Висновки до розділу 3

4. Стратегія управління при синхронізації годинника

4.1 Одноетапний оптимальний контроль

4.2. Глобальний оптимальний контроль LQG

4.3. Різниця "Компенсація" –Корекція

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Загальні висновки

З	Ли	№ докум.	Підпи	Д	Розвиток методів синхронізації в безпроводових сенсорних мережах. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.	Бандушкін						?	9?	
Перевір.	Лисенко О.								
Реценз.	Мошинська								
Н. Контр.	Петрова В.М.								
Затверд.	Явіся В. С.								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- WSN (Wireless Sensor Network) – безпроводова сенсорна мережа
- БСМ – безпроводова сенсорна мережа
- ТОО – технічне обслуговування обладнання
- ISM (industrial, scientific and medical) – частотний діапазон
- MAC (Media Access Control) – рівень управління доступом до середовища
- TDMA (Time Division Multiple Access) – доступ з розділенням у часі
- КПД – коеф. кор. дії
- GPS (Global Positioning System) – система глобального позиціонування
- TDMA (Time Division Multiple Access) – доступ з розділенням у часі
- TDP (Time-Diffusion Synchronization Protocol) – протокол дифузійної синхронізації
- UTC (Coordinated Universal Time) – всесвітній координований час
- WAN (Wide Area Network) – глобальна мережа
- WLAN (Wireless Local Area Network) – безпроводова локальна мережа
- WPAN (Wireless Personal Area Network) – безпроводова персональна мережа
- IoT (Internet of Things) - Інтернет речей
- GPRS (General Packet Radio Service) — загальний сервіс пакетної радіопередачі
- FFD - (Full Function Device) – повнофункціональний пристрій
- RFD - (Reduced Function Device) – пристрої з обмеженим набором функцій

ВСТУП

В останні роки значна увага була спрямована на технології бездротових сенсорних мереж (WSN), які мають перспективний потенціал для застосування в різних галузях та мають велике значення для національної оборони, моніторингу навколишнього середовища, автоматизації дому, транспорту тощо. Однак через недосконалість тактового генератора, зміни середовища та затримку синхронізацію годинників вузлів важко. І, будучи важливою технічною підтримкою WSN, у більшості додатків та алгоритмів потрібні загальні часові рамки, такі як злиття даних, управління живленням та розташування вузлів. Тож синхронізація годинника між вузлами стає актуальною проблемою в даний час.

Завдяки швидкому розвитку широкомасштабної технології інтеграції та мікроелектронної механічної системи інтеграція збору даних, бездротового зв'язку та обчислювальних можливостей на тих самих крихітних пристроях не є технічною проблемою. У літературі передбачається, що датчики мають певну обчислювальну здатність. І внаслідок стрімкого розвитку технологій, цілком обґрунтовано, що автор припускає, що вузли датчиків не тільки мають можливість бездротового зв'язку та збору даних, але також мають певну обчислювальну та обробну здатність. Тобто для аналізу проблеми синхронізації годинника вузли датчиків також мають функцію контролера. Тому управління виконується в локальному вузлі.

Існуючі літератури теорії управління мережею провели велику кількість досліджень моделі теорії управління мережею на ранніх стадіях, які виявилися ефективними. Через невизначені фактори запровадженої бездротової мережі, а саме втрату пакетів, затримку тощо, разом із класичною теорією управління також слід враховувати випадкові характеристики каналу зв'язку, що створює великі труднощі для вивчення стабільності динамічної системи. Присвячений пошуку певного порогу швидкості надходження пакетів, вище якого очікуване значення матриці коваріації помилок стає обмеженим із плином часу до нескінченності; Припустили деяку велику кількість помилок у конвергенції та проаналізували стабільність оцінки з точки зору ймовірності; розглянув наявність втрат пакетів спостереження і показав, що дисперсія похибки мінімальної середньоквадратичної похибки оцінки менше, ніж у лінійної мінімальної середньоквадратичної похибки оцінки, і перша має ширше застосування.

Розглядав проблеми контролю та оцінки стану в умовах ненадійної мережі. Подібно до протоколів, контролер та оцінювач можуть бути спроектовані незалежно, і існує поріг мережі, нижче якого оптимальний контролер не може

стабілізувати систему; Розроблено два типи схем управління, централізоване управління та розподілене управління, для системи управління бездротовою мережею; Далі порівняв два типи схем управління і дійшов висновку, що розподілене управління є більш захищеним від втрати пакетів і має меншу обчислювальну складність, ніж централізоване управління. Порівнюючи вищезазначені моделі теорії управління, виявляється, що питання синхронізації годинника може бути змодельовано як модель простору станів. Також змодельовала задачу синхронізації годинника як модель простору станів, представила розподілений алгоритм фільтра Калмана для тактових параметрів всього відстеження вузлів мережі. Він також перевіряє, що моделювання проблеми синхронізації годинника як моделі простору станів є здійсненним, навіть має незрівнянну перевагу в тому, що його легко розширити до розподіленої структури порівняно з традиційною оцінкою параметрів тактової частоти. Ця стаття, використовуючи взаємозв'язки тактової частоти на основі двостороннього механізму обміну повідомленнями, встановлює модель простору станів синхронізації годинника, намагаючись проаналізувати проблему синхронізації годинника з точки зору теорії управління.

Метод синхронізації годинника на основі управління, запропонованого в цій роботі, можна описати наступним чином: встановити модель простору стану синхронізації годинника; і на цій основі запровадити контроль; кількісно аналізувати проблему синхронізації годинника за стратегією управління. Через використання двостороннього механізму обміну тактовими повідомленнями та протиставлення теорії управління мережею виявлено, що управління синхронізацією тактової частоти здійснюється в локальній мережі. Таким чином, коли проблема синхронізації тактової частоти аналізується в WSN, існує втрата пакетів спостереження, але не контролюється втрата пакетів. Однак наявність втрати пакетів спостереження неминуче вплине на продуктивність системи і навіть зробить систему нестабільною. Стійкість втрати пакетів суворо обговорювалась, і було встановлено межу втрати пакетів на передумові гарантування стабільності системи. Отже, автор може вказати межу втрат пакетів та відповідні висновки за наявності втрати пакетів спостереження, аналізуючи проблему синхронізації тактової частоти в WSN.

1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Огляд БСМ.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) можна визначити як самоконфігуровані та безінфраструктурні бездротові мережі для моніторингу фізичних або екологічних умов, таких як температура, звук, вібрація, тиск, рух чи забруднюючі речовини, а також для спільної передачі своїх даних через мережу, де дані можна спостерігати та аналізувати. Базова станція діє як інтерфейс між користувачами та мережею. Можна отримати необхідну інформацію з мережі, вводячи запити та збираючи результати з сенсорів. Зазвичай бездротова мережа датчиків містить сотні тисяч вузлів датчиків. Вузли датчиків можуть спілкуватися між собою за допомогою радіосигналів. Бездротовий вузол датчика оснащений датчиками та обчислювальними пристроями, радіоприймачами та компонентами живлення. Окремі вузли в бездротовій сенсорній мережі (БСМ) за своєю суттю обмежені ресурсами: вони мають обмежену швидкість обробки, ємність зберігання даних і пропускну здатність зв'язку. Після розгортання вузлів датчиків вони несуть відповідальність за самоорганізацію відповідної мережевої інфраструктури, часто з мульти-доступним зв'язком з ними. Потім бортові датчики починають збирати потрібну інформацію. Бездротові сенсорні пристрої також реагують на запити, надіслані з "пункту управління", для виконання конкретних інструкцій або надання зразків зондування. Режим роботи вузлів датчика може бути як безперервним, так і з урахуванням подій. Для отримання інформації про місце розташування та позиціонування можна використовувати Глобальну систему позиціонування (GPS) та місцеві алгоритми позиціонування. Бездротові сенсорні пристрої можуть бути оснащені виконавчими механізмами, які можуть «діяти» за певних умов.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) дозволяють створювати нові програми та вимагають нетрадиційних парадигм для проектування протоколів через кілька обмежень. Завдяки вимозі до низької складності пристрою та низького споживання енергії (тобто тривалого терміну служби мережі), повинен бути знайдений належний баланс між можливостями зв'язку та обробки сигналів / даних. Це мотивує величезні зусилля у дослідницькій діяльності, процесі стандартизації та промислових інвестиціях у цій галузі з останнього десятиліття. В даний час більша частина досліджень БСМ зосереджена на розробці енерго- та обчислювально ефективних алгоритмів та протоколів, а область застосування обмежена простими програмами моніторингу та звітності, орієнтованими на дані. Алгоритм переходу кабельного режиму, який визначає мінімальну кількість активних датчиків для підтримки К-покриття місцевості, а також К-підключення мережі. Зокрема, він розподіляє періоди бездіяльності кабельних датчиків, не впливаючи на вимоги до покриття та підключення мережі, базуючись лише на локальній інформації.

Структура мережі збору даних із затримкою для бездротових сенсорних мереж. Завданням запропонованої мережевої структури є мінімізація затримок у процесах збору даних бездротових сенсорних мереж, що продовжує термін служби мережі. Розглянемо вузли ретрансляції для пом'якшення геометричних недоліків

мережі та використовували алгоритми, що базуються на оптимізації частинок, щоб знайти оптимальне розташування стоків щодо цих релейних вузлів для подолання життєвих проблем. Енергоефективне спілкування також було розглянуто та пропонує геометричне рішення для визначення оптимального розміщення датчиків для максимізації терміну служби мережі. Більшу частину часу дослідження бездротових сенсорних мереж розглядали однорідні сенсорні вузли. Але в наш час дослідники зосереджуються на неоднорідних сенсорних мережах, де вузли датчиків не схожі один на одного за своєю енергією. У роботі звертають до проблеми розгортання ретрансляційних вузлів для забезпечення стійкості до несправностей із вищим підключенням до мережі в неоднорідних бездротових сенсорних мережах, де вузли датчиків мають різні радіуси передачі. Нові мережеві архітектури з неоднорідними пристроями та недавній розвиток цієї технології усувають поточні обмеження та значно розширюють спектр можливих застосувань для БСМ, і все це дуже швидко змінюється.

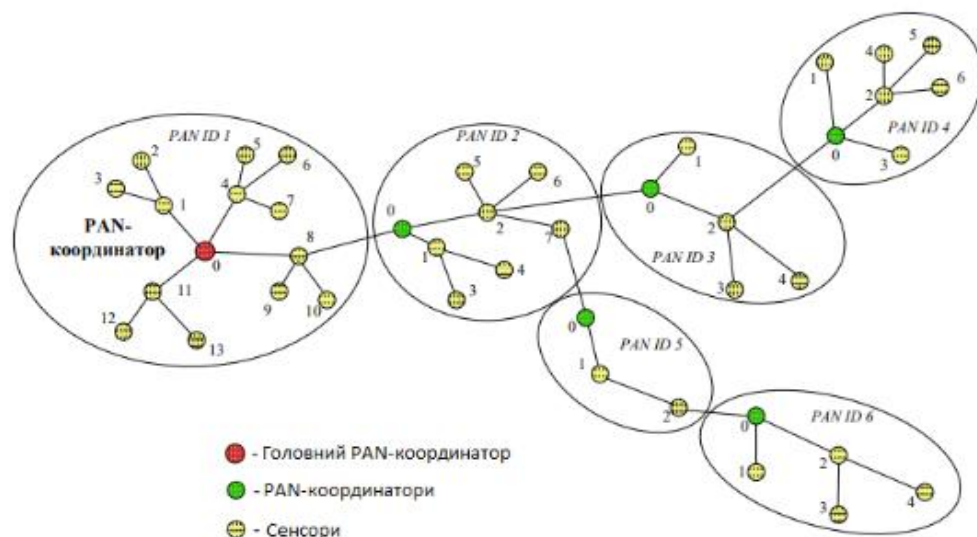


Рис. 1 Розгорнута БСМ.

1.2 Застосування бездротової сенсорної мережі

Бездротові сенсорні мережі набули значної популярності завдяки своїй гнучкості у вирішенні проблем у різних доменах додатків і можуть потенційно змінити наше життя різними способами.

Військовій сфері: Бездротові сенсорні мережі можуть бути невід'ємною частиною систем військового управління, управління, зв'язку, обчислювальної техніки, розвідки, систем спостереження на полі бою, розвідки та наведення цілей.

Моніторинг площі: При моніторингу площі вузли датчиків розміщуються в регіоні, де слід спостерігати явисьце. Коли датчики виявляють відстежувану подію (тепло, тиск тощо), про цю подію повідомляється одна з базових станцій, яка потім вживає відповідних заходів.

Транспорт: Інформація про дорожній рух в режимі реального часу збирається БСМ, щоб надалі подавати моделі транспортування та попереджати водіїв про затори та проблеми з дорожнім рухом.

Застосування для охорони здоров'я: Деякі програми для охорони здоров'я для сенсорних мереж підтримують інтерфейси для інвалідів, інтегрований моніторинг пацієнтів, діагностику та введення ліків у лікарнях, телемоніторинг фізіологічних даних людини та відстеження та моніторинг лікарів або пацієнтів у лікарні.

Екологічне зондування: Термін Екологічні сенсорні мережі розроблено, щоб охопити багато застосувань БСМ для досліджень науки про Землю. Це включає зондування вулканів, океанів, льодовиків, лісів тощо. Деякі інші основні райони перелічені нижче:

- Моніторинг забруднення повітря
- Виявлення лісових пожеж
- Моніторинг теплиць
- Виявлення зсуву

Структурний моніторинг: Бездротові датчики можуть бути використані для моніторингу руху всередині будівель та інфраструктури, таких як мости, естакади, набережні, тунелі тощо, що дозволяє інженерним практикам віддалено контролювати активи, не потребуючи дорогих відвідувань місця.

Промисловий моніторинг: Бездротові сенсорні мережі були розроблені для технічного обслуговування обладнання (ТОО), оскільки вони забезпечують значну економію коштів та забезпечують нові функції. У дротових системах встановлення достатньої кількості датчиків часто обмежується вартістю проводки.

Сільськогосподарський сектор: використання бездротової мережі звільняє фермера від обслуговування електропроводки в складних умовах. Автоматизація зрошення забезпечує більш ефективне використання води та зменшує кількість відходів.

1.3 Проблеми проектування бездротової сенсорної мережі

Розгортання сенсорних мереж, які є надмножиною тих, що знаходяться в бездротових спеціальних мережах, ставить перед собою багато проблем. Вузли датчиків взаємодіють по бездротовій лінії з втратами без інфраструктури. Додаткова проблема пов'язана з обмеженням, як правило,

невідновлюваним джерелом енергії вузлів датчиків. Для того, щоб максимізувати термін служби мережі, протоколи потрібно розробляти з самого початку з метою ефективного управління енергетичними ресурсами.

Несправності: Вузли датчиків вразливі і часто розміщуються в небезпечному середовищі. Вузли можуть вийти з ладу через апаратні проблеми, фізичні пошкодження або вичерпання енергопостачання. Ми очікуємо, що відмови вузлів будуть набагато вищими, ніж ті, які зазвичай розглядаються в дротових або інфраструктурних бездротових мережах. Протоколи, розгорнуті в сенсорній мережі, повинні мати можливість виявляти ці збої якомога швидше і бути достатньо надійними для обробки відносно великої кількості несправностей, зберігаючи загальну функціональність мережі. Це особливо стосується конструкції протоколу маршрутизації, яка повинна забезпечувати доступність альтернативних шляхів для перенаправлення пакетів. Різні середовища розгортання пред'являють різні вимоги до відмовостійкості.

Масштабованість: сенсорні мережі варіюються за масштабом від декількох вузлів до потенційно декількох сотень тисяч. Крім того, щільність розгортання також є змінною. Для збору даних з високою роздільною здатністю щільність вузла може досягати рівня, коли вузол має кілька тисяч сусідів у своєму діапазоні передачі. Протоколи, розгорнуті в сенсорних мережах, повинні бути масштабованими до цих рівнів і мати можливість підтримувати належну продуктивність.

Витрати на виробництво: Оскільки багато моделей розгортання вважають вузли датчиків пристроями одноразового використання, сенсорні мережі можуть конкурувати з традиційними підходами збору інформації лише в тому випадку, якщо окремі вузли датчиків можуть бути виготовлені дуже дешево. Цільова ціна, передбачена для вузла датчика, в ідеалі повинна бути менше \$ 1.

Апаратні обмеження: Як мінімум, кожен вузол датчика повинен мати сенсорний блок, блок обробки, блок передачі та джерело живлення. За бажанням, вузли можуть мати декілька вбудованих датчиків або додаткові

пристрої, такі як система локалізації, щоб забезпечити маршрутизацію з урахуванням місцезнаходження. Однак кожна додаткова функціональність має додаткові витрати та збільшує енергоспоживання та фізичний розмір вузла. Таким чином, додаткову функціональність потрібно завжди збалансувати з вимогами щодо вартості та низького енергоспоживання.

Топологія сенсорної мережі: Хоча мережі БСМ еволюціонували в багатьох аспектах, вони продовжують залишатися мережами з обмеженими ресурсами з точки зору енергії, обчислювальної потужності, пам'яті та комунікаційних можливостей. З цих обмежень енергоспоживання має першорядне значення, що демонструється великою кількістю алгоритмів, методів та протоколів, розроблених для економії енергії і, таким чином, продовження терміну служби мережі. Технічне обслуговування топології - одна з найважливіших досліджених проблем зменшення споживання енергії в бездротових сенсорних мережах.

Медіа передачі: Зв'язок між вузлами зазвичай здійснюється за допомогою радіозв'язку через популярні діапазони ISM. Однак деякі сенсорні мережі використовують оптичний або інфрачервоний зв'язок, причому останні мають перевагу надійності та практично без перешкод.

Споживання електроенергії: Як ми вже бачили, багато проблем сенсорних мереж обертаються навколо обмежених енергоресурсів. Розмір вузлів обмежує розмір акумулятора. Розробка програмного та апаратного забезпечення повинна ретельно розглянути питання ефективного використання енергії. Наприклад, стиснення даних може зменшити кількість енергії, що використовується для радіопередачі, але використовує додаткову енергію для обчислень та / або фільтрації. Енергетична політика також залежить від застосування; в деяких додатках може бути прийнятним вимкнути підмножину вузлів для економії енергії, тоді як для інших програм потрібні всі вузли, що працюють одночасно.

1.4 Структура бездротової сенсорної мережі

Структура бездротової сенсорної мережі включає різні топології мереж радіозв'язку. Коротке обговорення топологій мережі, що застосовуються до бездротових сенсорних мереж, викладено нижче:

1.4.1 Зіркова мережа (одна точка-багатоточка)

Топологія Зірка - це топологія зв'язку, при якій одна базова станція може надсилати та / або отримувати повідомлення до ряду віддалених вузлів. Віддаленим вузлам не дозволяється надсилати повідомлення один одному. Перевага цього типу мережі для бездротових сенсорних мереж включає простоту та можливість мінімізувати споживання енергії віддаленим вузлом. Це також забезпечує низький рівень затримки зв'язку між віддаленим вузлом та базовою станцією. Недоліком такої мережі є те, що базова станція повинна знаходитися в радіусі радіопередачі всіх окремих вузлів і не є такою надійною, як інші мережі, через її залежність від одного вузла для управління мережею.

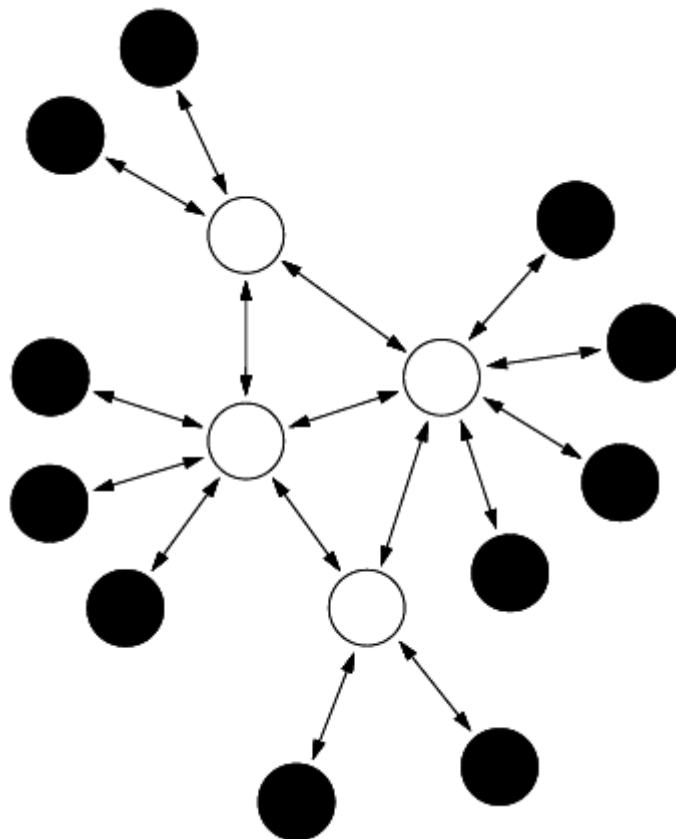


Рис. 2 Топологія Зірка

1.4.2 Мережева топологія

Мережева мережа дозволяє передавати дані в один вузол в інший вузол мережі, що знаходиться в межах його діапазону радіопередачі. Це дозволяє використовувати так званий мульти-стрибковий зв'язок, тобто якщо вузол хоче надіслати повідомлення іншому вузлу, що знаходиться поза діапазоном радіозв'язку, він може використовувати проміжний вузол для пересилання повідомлення на потрібний вузол. Ця топологія мережі має перевагу надмірності та масштабованості. Якщо окремих вузлів виходить з ладу, віддалений вузол все ще може обмінюватися даними з будь-яким іншим вузлом у своєму діапазоні, який, у свою чергу, може переслати повідомлення у потрібне місце. Крім того, діапазон мережі не обов'язково обмежується діапазоном між окремими вузлами; його можна просто розширити, додавши до системи більше вузлів. Недоліком цього типу мережі є споживання енергії для вузлів, що реалізують мульти-стрибковий зв'язок, зазвичай вище, ніж для вузлів, які не мають такої можливості, часто обмежуючи час автономної роботи. Крім того, із збільшенням кількості стрибків зв'язку до пункту призначення, час доставки повідомлення також збільшується, особливо якщо необхідна робота вузлів з низьким енергоспоживанням.

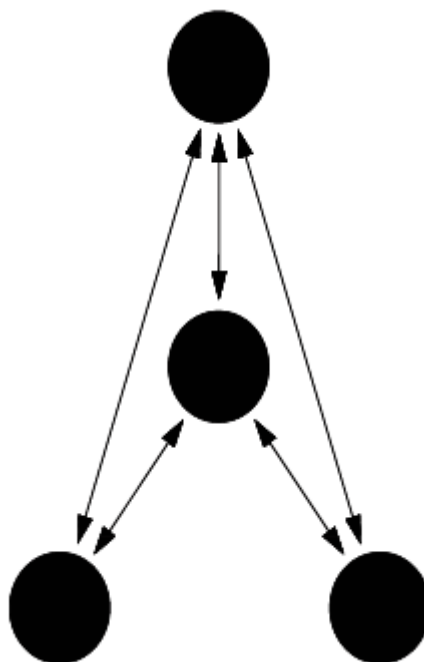


Рис. 3 Топологія мережа

1.4.3 Гібридна Зірка - Мережа топологія

Гібрид між зірковою та мережевою топологією забезпечує надійну та універсальну мережу зв'язку, зберігаючи при цьому можливість мінімізувати споживання енергії вузлами бездротового датчика. У цій топології мережі вузли датчика з найменшою потужністю не мають можливості пересилати повідомлення. Це дозволяє підтримувати мінімальне споживання енергії. Однак інші вузли в мережі мають функцію мульти-стрибка, що дозволяє їм пересилати повідомлення з вузлів малої потужності на інші вузли мережі. Як правило, вузли з можливістю мульти-стрибка мають більшу потужність і, якщо це можливо, часто підключаються до електромережі. Це топологія, реалізована стандартним мережевим мережевим стандартом, що називається ZigBee.

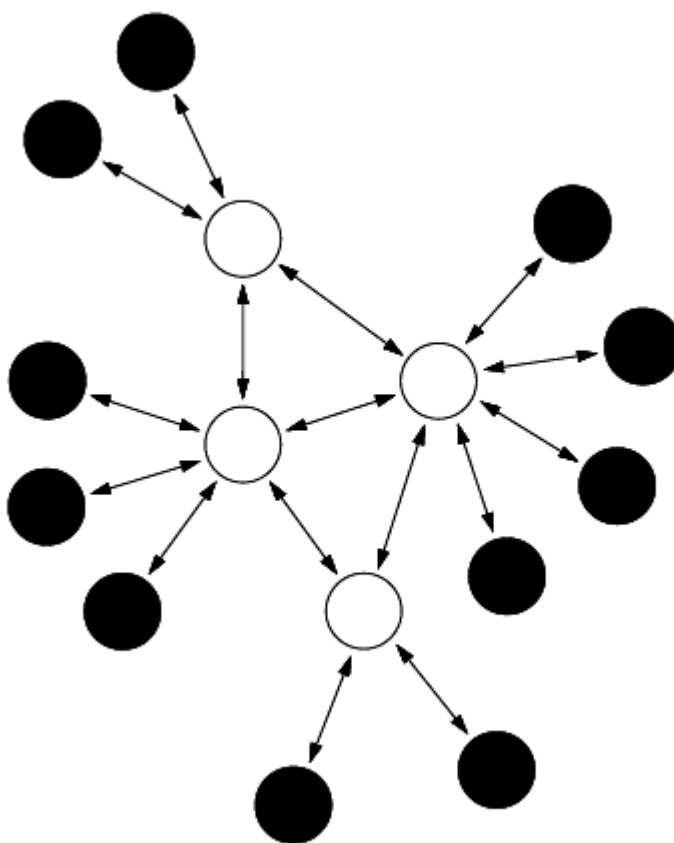


Рис. 4 Гібридна Зірка - Мережа топологія

1.5 Структура бездротового вузла датчика

Вузол датчика складається з чотирьох основних компонентів, таких як блок зондування, блок обробки, блок трансивера та блок живлення, як показано на рисунку 5. Він також має додаткові компоненти, що залежать від застосування, такі як система пошуку місця, генератор електроенергії мобілізатор. Блоки зондування зазвичай складаються з двох субодиниць: датчиків та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Аналогові сигнали, що виробляються датчиками, перетворюються АЦП в цифрові сигнали, а потім подаються в блок обробки. Блок обробки, як правило, пов'язаний з невеликим блоком зберігання, і він може керувати процедурами, які змушують вузол датчика співпрацювати з іншими вузлами для виконання призначених завдань зондування. Блок трансивера підключає вузол до мережі. Одним з найважливіших компонентів датчикового вузла є блок живлення. Блоки живлення можуть підтримуватися енергоблоком, таким як сонячні елементи. Інші субодиниці вузла залежать від програми.

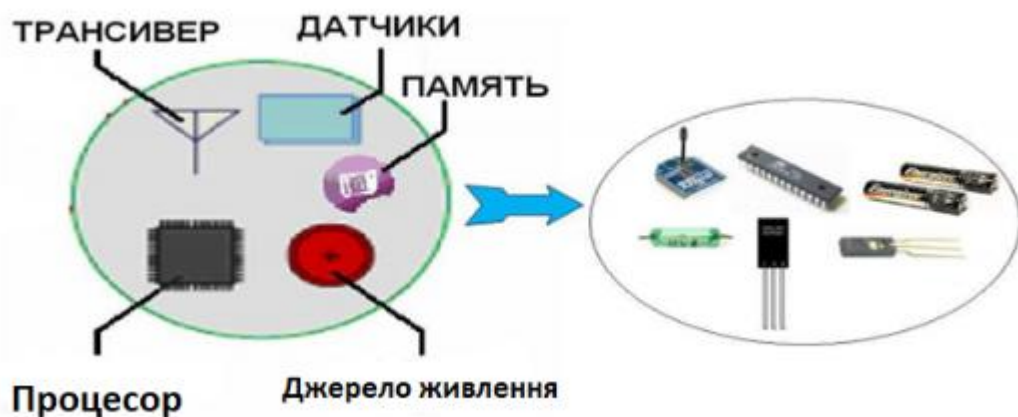


Рис. 5 Компоненти датчика

Використовуючи флеш-пам'ять, віддалені вузли отримують дані за командою від базової станції або за подією, визначеною одним або кількома входами до вузла. Більше того, вбудоване програмне забезпечення може бути оновлене за допомогою бездротової мережі на місцях.

Мікропроцесор має ряд функцій, включаючи:

- Управління збором даних з датчиків

- Виконуючи функції управління живленням
- Взаємодія даних датчика з фізичним радіошарусом
- Управління протоколом радіомережі

Ключовим аспектом будь-якого бездротового зондуючого вузла є мінімізація споживаної системою енергії. Зазвичай радіопідсистема вимагає найбільшої потужності. Тому дані надсилаються по радіомережі лише тоді, коли це потрібно. У вузол потрібно завантажити алгоритм, щоб визначити, коли надсилати дані на основі сприйнятої події. Крім того, важливо мінімізувати потужність, споживану самим датчиком. Отже, апаратне забезпечення повинно бути спроектовано таким чином, щоб мікропроцесор міг розумно контролювати потужність радіостанції, датчика та датчика сигналізації.

1.6 Структура зв'язку бездротової сенсорної мережі

Вузли датчиків, як правило, розпорошені в сенсорному полі. Кожен з цих розсіяних вузлів датчика має можливості збору даних і направлення даних назад до кінцевих користувачів. Дані маршрутизуються назад до кінцевого користувача за допомогою багатокористувацької безінфраструктурної архітектури.

Стек протоколів, що використовується датчиком та вузлами датчиків, наведений на рисунку 6. Цей стек протоколів поєднує в собі потужність та обізнаність про маршрутизацію, інтегрує дані з мережевими протоколами, ефективно передає живлення через бездротове середовище та сприяє спільним зусиллям вузлів датчиків. Стек протоколів складається з рівня додакту, транспортного рівня, мережевого рівня, рівня каналу передачі даних, фізичного рівня, площини управління живленням, площини управління мобільністю та площини управління завданнями. Залежно від завдань зондування на прикладному рівні можуть бути створені та використані різні типи прикладного програмного забезпечення. Цей рівень робить апаратне та програмне забезпечення найнижчого рівня прозорим для

кінцевого користувача. Транспортний рівень допомагає підтримувати потік даних, якщо цього вимагає програма сенсорних мереж. Мережевий рівень піклується про маршрутизацію даних, що подаються транспортним рівнем, специфічні багатопроцесорні бездротові протоколи бездротової маршрутизації між вузлами датчиків і раковиною. Рівень каналу даних відповідає за мультиплексування потоків даних, виявлення кадру, контроль доступу до медіа (MAC) та контроль помилок. Оскільки навколишнє середовище шумне, а вузли датчиків можуть бути мобільними, протокол MAC повинен враховувати потужність та мінімізувати зіткнення з трансляцією сусідів. Фізичний рівень відповідає потребам простої, але надійної модуляції, вибору частоти, методів шифрування даних, передачі та прийому.

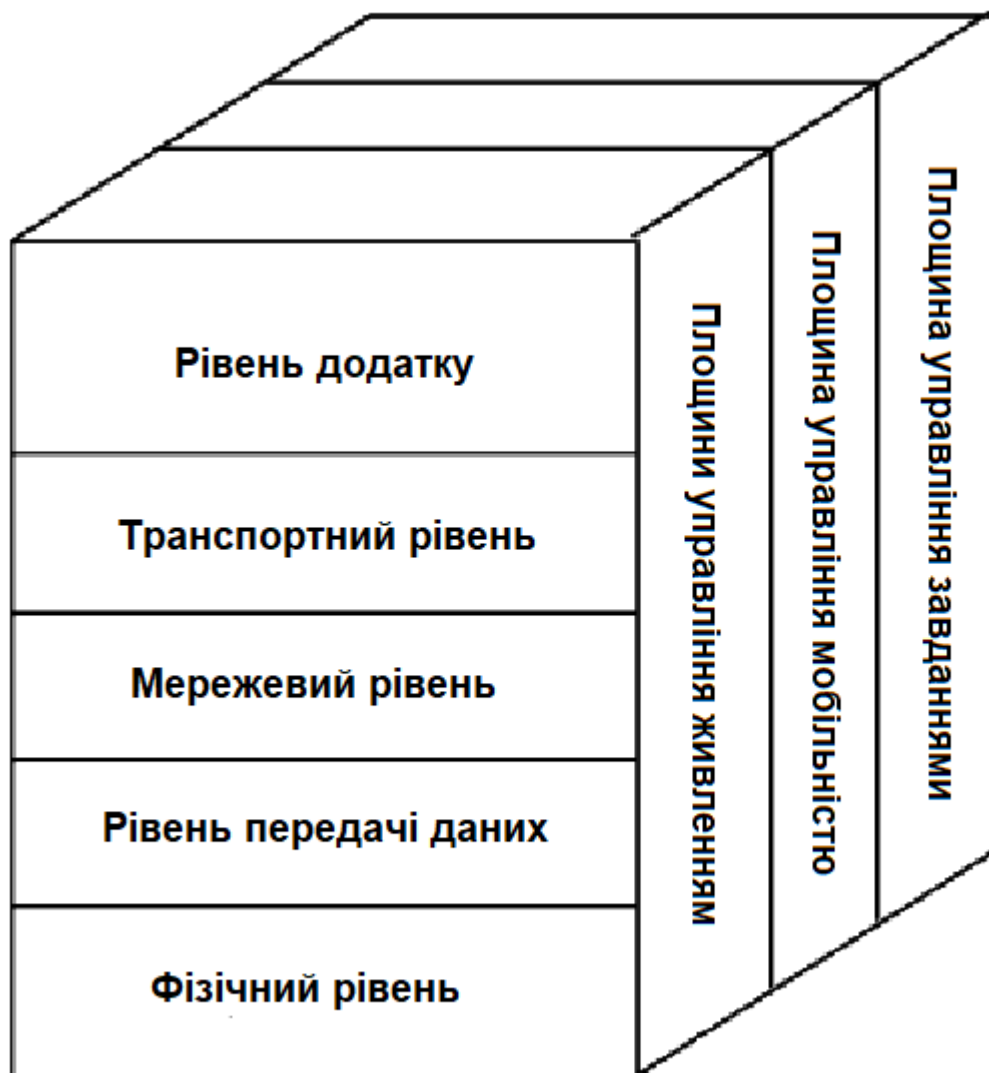


Рис. 6 Стек протоколів

Крім того, площини потужності, мобільності та управління завданнями контролюють потужність, рух та розподіл завдань між вузлами датчиків. Ці площини допомагають вузлам датчиків координувати завдання зондування та знижувати загальне споживання енергії.

1.7 Висновок до першого розділу

Метою цього розділу є обговорення кількох важливих питань БСМ з точки зору застосування, дизайну та технології. Для проектування БСМ нам потрібно враховувати різні фактори, такі як гнучкість, енергоефективність, стійкість до несправностей, висока точність зондування, низька вартість і швидке розгортання, перш за все вимоги до застосування. Ми сподіваємось, що широкий спектр областей застосування зробить сенсорні мережі невід'ємною частиною нашого життя в майбутньому. Однак реалізація сенсорних мереж повинна задовольнити ряд обмежень, таких як масштабованість, вартість, обладнання, зміна топології, середовище та енергоспоживання. Оскільки ці обмеження дуже жорсткі та специфічні для сенсорних мереж, потрібні нові бездротові спеціальні мережеві протоколи. Щоб задовольнити вимоги, багато дослідників займаються розробкою технологій, необхідних для різних рівнів стеку протокольних мереж сенсорних мереж.

Досягнення бездротових мереж і сенсорних технологій відкривають цікаву можливість керувати діяльністю людини в розумному домашньому середовищі. Діяльність у реальному житті часто є більш складною, ніж тематичні дослідження як для одного, так і для кількох користувачів. Розслідування таких складних справ може бути дуже складним завданням, тоді як ми одночасно розглядаємо як однокористувацьку, так і багатокористувацьку діяльність. Майбутня робота буде зосереджена на фундаментальній проблемі розпізнавання діяльності кількох користувачів за

допомогою бездротової мережі сенсорів тіла. Бездротові сенсорні мережі обіцяють забезпечити інтелектуальну парадигму зв'язку, яка дозволяє створити інтелектуальну мережу, здатну обробляти програми, які розвиваються відповідно до вимог користувача. Ми віримо, що найближчим часом дослідження WSN матимуть великий вплив на наше повсякденне життя. Наприклад, це створить систему постійного спостереження за фізіологічними сигналами, поки пацієнти перебувають удома. Це зменшить витрати на спостереження за пацієнтами та збільшить ефективне використання фізіологічних даних, і пацієнти матимуть доступ до найвищої якості медичної допомоги у власних будинках. Таким чином, це дозволить уникнути лиха та зривів, спричинених тривалим перебуванням у стаціонарі.

2. СИНХРОНІЗАЦІЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Синхронізація та проблеми синхронізації

У розподілених системах комп'ютери підтримують логічний годинник так, щоб вони ніколи не відрізнялись суттєво один від одного. Комп'ютерні годинники, як правило, мають два компоненти: джерело частоти та засіб збору подій синхронізації (включаючи станцію та лічильник для перехоплення тактових сигналів, застосованих до програмного забезпечення). Впровадження комп'ютерних годинників різняться в залежності від операційних систем та апаратних платформ. Однак основними джерелами помилок синхронізації є неізольовані кварцові генератори та генеровані тактові імпульси. Теоретично два годинники були б синхронізовані, якби їх зміщення були встановлені рівними, а їх джерела частоти працювали з однаковою швидкістю. Наскільки на практиці годинники встановлюються з обмеженою точністю, а джерела частоти працюють з дещо різною швидкістю. Крім того, частота кварцових генераторів змінюється через початкові допуски на вихід, старіння, температуру, тиск та інші фактори. Через нестабільність, розподілені годинники повинні регулярно синхронізуватися.

2.2 Значення синхронізації

Синхронізація часу - це процес, який забезпечує загальне уявлення про час у розподілених системах. БСМ має зробити кілька основних речей, таких як:

З'єднання інформації, журнали повідомляють про приєднання до деяких (або всіх) загальнодоступних мереж. На даний момент для обробки метрик потрібні алгоритми з'єднання даних. Однак існує велика різниця між повідомленнями про

затримки в мережі, що означає, що повідомлення з доставкою надходять на кожен запит;

Управління живленням. Енергоефективність є головним фактором проектування БСМ, оскільки датчики часто ремонтуються після розгортання та модифікації; Заміна батареї часто є проблематичною або неможливою протягом усього життя. Багато енергозберігаючих операцій значною мірою покладаються на синхронізацію часу. Наприклад, вузли наступного циклу (контроль сну та неспання) економить багато енергії, використовуючи мінімум енергії під час низького сну;

План ретрансляції. Більшість протоколів розкладу часу вимагають тимчасової синхронізації. Наприклад, множинний доступ з розподілом часу (TDMA), одна з популярних схем зв'язку для розподілених мереж, може застосовуватися лише до однієї синхронізованої мережі;

Численні протоколи локалізації, безпеки та відстеження prot також вимагають від вузлів записувати свої повідомлення та події;

У сенсорній мережі велика кількість вузлів може контролювати одну фізичну подію. Основною функцією сенсорної мережі є збір результатів цих спостережень в цілому. Час є ключовим елементом поєднання даних. Наприклад, якщо датчики можуть виявляти лише близькість об'єкта, то інформацію високого рівня (наприклад, швидкість, розмір) можна отримати, порівнюючи дані з декількох вузлів. Наприклад, швидкість мобільного об'єкта може бути оцінена коефіцієнтом місцезнаходження та тимчасовою відстанню між двома безперервними спостереженнями об'єкта різними вузлами датчиків. Оскільки багато фізичних подій можуть відбуватися протягом короткого періоду часу, однією з функцій сенсорної мережі є розділення датчиків та їх групування, де кожна група представляє фізичну подію. Тимчасові з'єднання між вузлами датчиків є ключовими елементами для ізоляції.

Тому синхронізація часу є одним із найважливіших наукових питань у розвитку енергоефективних БСМ.

2.3. Потреби синхронізації в БСМ

Існуючий метод часу в BSM недостатній для багатьох факторів. Сенсорні мережі повинні мати високу економію енергії, оскільки БСМ припускає, що вузли будуть неконтрольованими і матимуть остаточний запас батареї. Існуючі методи синхронізації часу не враховують цього обмеження. Такі протоколи, як NTP, є консервативними у використанні смуги пропускання і не є неефективними в цьому відношенні, коли пристрої споживають значну кількість енергії навіть при пасивному прослуховуванні ефіру.

Основні показники, які найбільш важливі в синхронізації БСМ:

- 1) Точність, що означає різницю в групі вузлів БСМ або максимальне значення помилки порівняно із зовнішніми параметрами;
- 2) Термін служби датчику, який може варіюватися від синхронізації на постійній основі поки мережа працює, до миттєвої.
- 3) Масштабність – набір сенсорів, які загалом захоплюють регіон та синхронізовані один з одним.
- 4) ПД – витрати часу та витрати енергії для того щоб досягнути синхронізації БСМ.
- 5) Ціна та форм-фактор – стає найбільш важливим фактором в мережі, що включає в себе сотні або навіть тисячі автономних датчиків, які об'єднані в сенсорну мережу.

Усі рішення, запропоновані в існуючих методах синхронізації часу, є компромісними - жоден метод не є оптимальним у всіх випадках. Наприклад, користувальницький GPS-приймач можна прирівняти до часового відліку з точністю до 200 нс. Однак пристрої GPS не можна часто використовувати (наприклад, під водою), і синхронізація може зайняти кілька хвилин. У деяких випадках GPS-пристрої також будуть набагато більшими та дорожчими, ніж датчики.

Доцільно розглянути невелику групу вузлів з радіостанцією малої потужності. Якщо один вузол передає сигнал, інші можуть використовувати цей сигнал як еталон для часу, коли вони отримали сигнал. Забезпечена таким чином синхронізація локалізована в додатку і має обмеження точності змінних затримок радіозв'язку та затримок поширення радіохвиль. Цей час синхронізації буде обмеженим, оскільки годинник вузла буде відхилятися від вихідного імпульсу. У будь-якому випадку, імпульс вимагає лише передачі одного сигналу, тому він є швидким та досить енергоефективним.

Важливу енергетичну економіку можна створити, виключивши імітацію того самого підрозділу. Для цього поділу часто потрібна однакова мітка точності; Десятки чи близько того. Якщо ви не використовуєте дані, їх можна надрукувати в мережі, а якщо ви керуєте проміжними вузлами, синхронізація вимагає комплексного складеного матеріалу.

Що стосується коефіцієнтів синхронізації, синхронізація часу є типовою проблемою в BSM, наприклад, годинники та годинникові годинники. Хоча протокол синхронізації часу для дотику повинен вирішувати проблемні проблеми важкого стану, вагітні жінки звертають увагу на унікальні особливості BSM, які часто виключають використання технології синхронізації.

2.3.1. Враховуючи вплив умов зовні

Швидкість переміщення годинника може змінюватися залежно від коливань температури, тиску та вологості. Хоча звичайні дротові комп'ютери працюють у досить стабільному стані (наприклад, у кімнатах або офісах з кондиціонером), бездротові датчики знаходяться в дорозі та в агресивних ситуаціях, коли відбуваються ці коливання властивостей навколишнього середовища. У контрольованих умовах частота генератора змінюється до $m \text{ md}$ (відхилення 1 мд є похибкою приблизно 1 секунду кожні 12 днів) через зафіксовану зміну кімнатної температури (Mills1998). Для зовнішніх датчиків за низькою вартістю ці відмінності, ймовірно, будуть дуже сильними.

2.3.2. Проблеми пов'язані з обмеженим електроживленням

Бездротові датчики зазвичай працюють від кінцевих джерел енергії, наприклад, одноразових або акумуляторних батарей (наприклад, через сонячні батареї). Заміна батарей може суттєво збільшити вартість BSM, особливо коли вузли знаходяться у важкому для ремонту місці. Тому протокол синхронізації часу суттєво не сприяє енергоспоживанню бездротових вузлів для забезпечення тривалого терміну служби акумулятора. Оскільки зв'язок між вузлами датчиків, як правило, є основою для синхронізації часу, енергоефективні протоколи синхронізації часу повинні прагнути до мінімальної кількості невеликих повідомлень, необхідних для досягнення синхронізації вузлів.

2.3.3. Безпроводовість та мобільність сенсорних мереж

Бездротові середовища відомі як непередбачувані та коливання продуктивності внаслідок змін характеристик навколишнього середовища внаслідок дощу, туману, вітру та температури. Ці нестабільності впливають на обмеження пропускну здатності мережі, помилок та радіоперешкод в бездротових вузлах. Це може бути ускладнено асиметричними каналами бездротового зв'язку, такими як вузол А, може приймати повідомлення від вузла Б, тоді як повідомлення від вузла А є занадто слабким для належного тлумачення. Можуть існувати суттєві відмінності в характеристиках (затримки), що спричиняють асиметричні затримки зв'язку. Крім того, перешкоди зв'язку в бездротовій мережі залежать від щільності мережі, діапазону зв'язку та перешкод бездротових пристроїв та рівня активності цих пристроїв. Встановлений у транспортних засобах або перенесений приватними особами), він спричиняє значні та швидкі зміни в топології та якості зв'язку.

Нарешті, вузли датчиків виходять з ладу, вони можуть розрядитись, що вимагає синхронізації часу, яка продовжує працювати, незважаючи на зміни в топології мережі або щільності. Як правило, результатом цих проблем є постановка задачі для якісних протоколів синхронізації часу в БСМ.

2.3.4. Технічні обмеження

Дешеві та малопотужні датчики часто вимагають швидкості пам'яті для протоколів синхронізації часу. Розмір та вартість пристроїв не дають можливості використовувати велику і дорогу апаратну для синхронізації (наприклад, приймачі GPS). Тож протоколи синхронізації часу повинні бути створені, так щоб працювати на умовах обмежених ресурсів, без збільшення загальної вартості. БСМ часто збільшується і масштабується, із збільшенням кількості сенсорів, протокол синхронізації часу повинен теж масштабуватись. Нарешті, різні сенсорні програми мають різний рівень точності.

2.4 Висновки до розділу 2

Другий розділ порушує питання синхронізації часу в бездротових сенсорних мережах, підтверджуючи важливість цього аспекту роботи формул та бездротових сенсорних систем. Повна координація необхідна для повноцінного використання BSM з кількох причин - ефективного споживання енергії (в активному режимі синхронного режиму роботи датчика), успішний збір інформації (одночасний контроль події за допомогою декількох вузлів датчика) та її передача до контрольної точки. Розглянуто відмінності між традиційними бездротовими мережами та BSM та підкреслено останні особливості, що унеможлиблює використання загальних методів синхронізації за часом та часом.

3. Моделювання системи

3.1 Часова модель

У мережі кожен окремий датчик має власний годинник. Як показано на рисунку 7, в ідеалі годинник вузла датчика можна описати таким чином:, де означає ідеальний або контрольний час. Однак через недосконалість генератора годинника та вплив навколишнього середовища годинник відійде від ідеального часу, навіть якщо спочатку він раціонально налаштований. Загалом, тактова функція цього вузла змодельована як

$$C_i(t) = \theta + f \cdot t,$$

(1)

де θ та f представляють зсув тактової частоти (різниця фаз) та перекіс тактової частоти (різниця частот) відповідно.

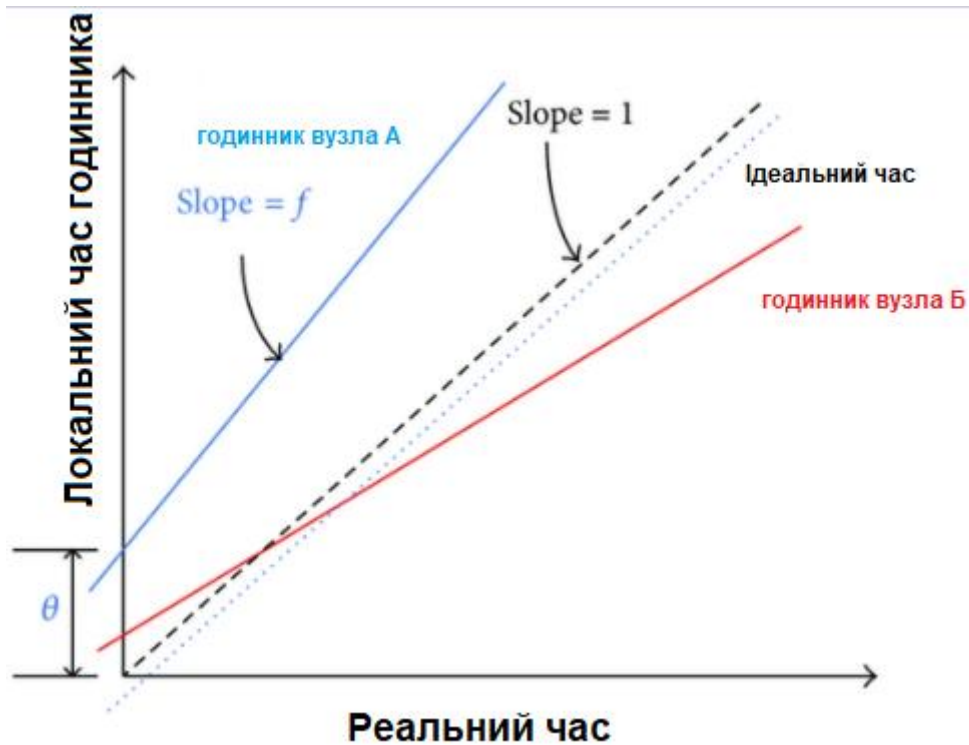


Рис. 7 Часова модель

Навіть незважаючи на те, що в БСМ кількість вузлів становить тисячі або навіть більше, у статті спочатку використовуються два вузли як плацдарм для детального моделювання та аналізу. Після строгого обговорення двох вузлів ми поширюємося на багато вузлів. У цьому випадку ми припускаємо, що в WSN є лише два вузли: Вузол А і Вузол В. Вони відходять від ідеального часу внаслідок змін температури зовнішнього середовища та недосконалості власних тактових генераторів. Графічне зображення взаємозв'язку проілюстровано на рисунку 7, тактовий зв'язок між двома вузлами, Вузлом А і Вузлом В, може бути представлений

$$C_B(t) = \theta^{AB} + f^{AB} \cdot C_A(t),$$

(2)

де θ^{AB} і f^{AB} означають відносне зміщення та перекося годинника між Вузлом А та Вузлом В відповідно. Очевидно, якщо два годинники ідеально синхронізовані, $\theta^{AB} = 0$, $f^{AB} = 1$. В іншому випадку, припустимо, Вузол В є еталонним вузлом, завдання синхронізації годинника полягає в тому, щоб оцінити θ^{AB} , f^{AB} , таким чином, що Вузол А може налаштувати свій власний годинник або перевести своє повідомлення про час на Node, коли це необхідно. Якщо в мережі є L вузлів, глобальна мережева синхронізація вимагає $C_i(t) = C_j(t)$ для всіх $i, j = 1, \dots, L$ або всіх відносних зсувів та перекося тактових оцінок щодо еталонного вузла.

3.2. Затримка синхронізації в БСМ

Припустимо, вузол А потрібно синхронізувати з посиланням на вузол В. Коли вузол А посилає свій поточний час на вузол А, якщо затримка доставки повідомлення абсолютно не затримується, вузол А може відразу дізнатися різницю між своїм годинником та годинником вузла В. Отже, лише модифікуючи власний годинник Вузла А, Вузол А можна синхронізувати з Вузлом В. На жаль, у реальній бездротовій мережі різні затримки впливають на доставку повідомлень, роблячи синхронізацію годинників набагато складнішою, ніж здається. Як правило, для оцінки відносних перекосів та зсувів тактових частот між вузлами використовується ряд передач синхронізації повідомлень. У якомусь сенсі синхронізацію годинника в мережах WSN можна розглядати як процес усунення наслідків випадкових затримок від передачі синхронізації повідомлень, що надсилаються по бездротовим каналам. Різні затримки, що виникають при доставці повідомлень, включають такі компоненти:

- 1) ч
час відправки: час використовується для побудови повідомлення та подання запиту надсилання на рівень контролю доступу (MAC) рівня відправника. Ця затримка сильно змінюється через накладні витрати на системний дзвінок операційної системи та поточне навантаження процесора;
- 2) ч
час доступу: після досягнення рівня MAC час очікування доступу до каналу. Це сильно змінюється в залежності від конкретного протоколу MAC та поточного навантаження на мережу;
- 3) ч
час передачі: час, витрачений на передачу повідомлення на фізичному (PHY) рівні відправника. Затримка визначається тривалістю повідомлення та швидкістю відправки;
- 4) ч
час поширення: фактичний час передачі повідомлення від відправника до одержувача по бездротовому каналу. Це просто залежить від відстані між двома вузлами;
- 5) ч
час прийому: час, необхідний для отримання повідомлення на рівні PHY приймача, який відповідає часу передачі;
- 6) ч
час отримання: час обробки отриманого повідомлення на прикладному рівні приймача.

Вищезазначені компоненти затримки можна класифікувати на два види: детерміновану затримку (фіксована затримка) та стохастичну затримку (змінна затримка). Змінна частина залежить від різних параметрів мережі (наприклад, стану мережі та трафіку). Тому не можна знайти жодної моделі затримки, яка б підходила для кожного випадку. Моделі функції щільності ймовірності (PDF), які були запропоновані для моделювання випадкових затримок у бездротових мережах, включають Гаусса, Експоненціальну, Гамму, Вейбулла та log-нормальну. Одним словом, ми побудували, що рівняння описувало тактову частоту вузлів та аналізувало тактові співвідношення між двома вузлами, які повинні підтримувати синхронізацію тактової частоти. Якщо вузол А потрібно синхронізувати з посиланням на вузол В, нам потрібно оцінити перекоси та зміщення між вузлами, і одночасно, враховуючи затримку обміну повідомленнями, ми повинні це знати.

3.3 Модель стану синхронізації годинника

Вищезазначене встановило тактову модель двох вузлів; цей розділ спеціально призначений для встановлення моделі синхронізації годинника між двома вузлами. Посилаючись на протокол синхронізації TPSN, ми також приймаємо класичний механізм двостороннього обміну повідомленнями між двома сусідніми вузлами, який зображений на рисунку 8. І на цьому малюнку ми вважаємо, що вузол А потрібно синхронізувати з еталонним вузлом В. Припускаючи час повідомлення обмінюються N разів, у k -му раунді обміну повідомленнями Вузол А відправляє повідомлення про синхронізацію, яке переносить $T_{1,k}$ на Вузол В в $T_{1,k}$ Вузол В досягає цього повідомлення в $T_{2,k}$ і потім відповідає на Вузол А в $T_{3,k}$ Відповідне повідомлення містить як $T_{2,k}$, так і $T_{3,k}$. Нарешті, Вузол А отримує відповідне повідомлення за адресою $T_{4,k}$. Зверніть увагу, що $T_{1,k}$ і $T_{4,k}$ - це локальний годинник Вузла А, тоді як $T_{2,k}$ і $T_{3,k}$ - місцевий годинник Вузла В. Після обміну N разів Вузол А отримує набір часових позначок $\{T_{1,k}, T_{2,k}, T_{3,k}, T_{4,k}\}_{k=1}^N$. Вищевказану процедуру можна математично змоделювати як

$$T_{2,k} = f(T_{1,k} + \tau + X_k) + \theta,$$

$$T_{3,k} = f(T_{4,k} - \tau - Y_k) + \theta,$$

(3)

де f і θ позначають відносний перекіс та зміщення тактової частоти Вузла А відносно Вузла В, відповідно τ є фіксована затримка (припустимо, що фіксована затримка між двома вузлами симетрична), і X_k і Y_k - випадкові затримки передачі від Вузла А до Вузла В та від Вузла В до Вузла А, відповідно. На практиці випадкова затримка різноманітна і описується як різний розподіл відповідно до різних суджень та застосувань, включаючи Гаусова, експоненціальне, Гама, Вейбулла та логарифмічну нормаль. У цій роботі ми припускаємо X_k і Y_k підпорядковуються незалежному ідентично розподіленому розподілу Гауса. Відповідно до теореми про центральну межу, випадкова вибірка розміру n береться з розподілів очікуваних значень, заданих μ та дисперсій, заданих σ^2 . Коли n досить велика, вибірка розподіл вибіркового середнього приблизно відповідає нормальному розподілу із середнім значенням μ та дисперсією σ^2/n . Якщо затримка є результатом накопичення незліченного незалежного випадкового процесу, затримка підтверджується моделлю затримки Гауса. І тест показав, що затримки змінних можуть бути змодельовані як розподілені випадкові величини Гауса з довірою 99,8%.

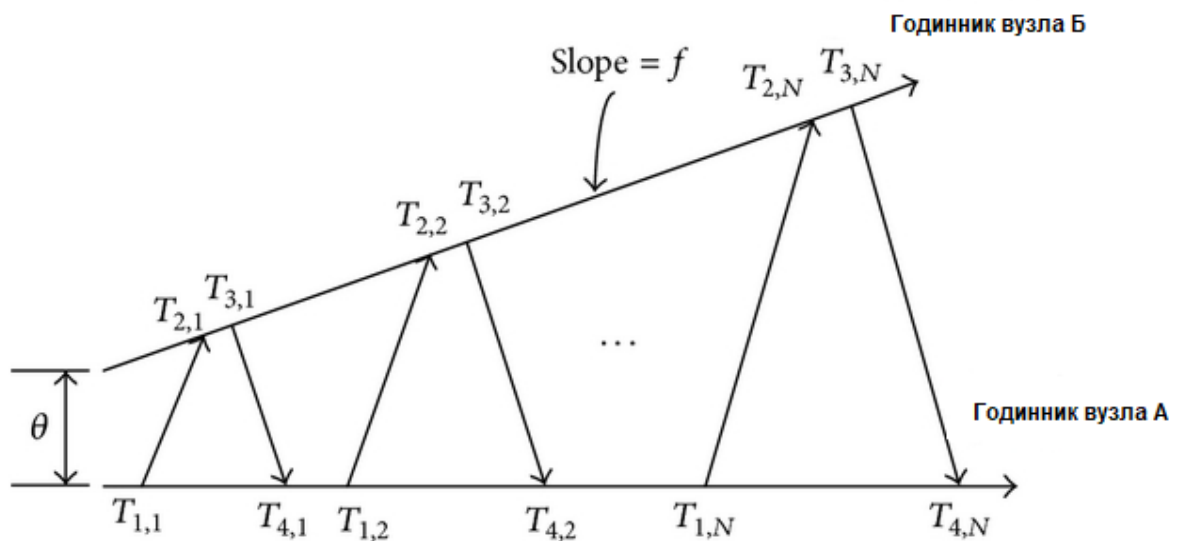


Рис. 8 Двосторонній обмін повідомленнями синхронізації між двома вузлами.

Зауважте, що на двох моментах ми повинні наголосити. По-перше, фіксована затримка між двома вузлами вважається симетричною. Гіпотеза підтверджується двома причинами. Перш за все, розмір пакета даних, який включає обмін повідомленнями часу між двома вузлами, як правило, дорівнює, а швидкість передачі пакета даних однакова, тому між двома вузлами є однаковий час передачі та час прийому. Більше того, час поширення визначається відстанню між двома

вузлами. Припустимо, що відносне положення між двома вузлами не змінюється в процесі обміну повідомленнями, тому час поширення залишається незмінним. По-друге, дрейф годинника (урізноманітнення тактової частоти), який відображає стабільність кристалічного генератора, є другою похідною від годинника. Тому він мало впливає на годинник, і ми можемо думати, що перекіс годинника (f) не має явних змін за один період синхронізації. Але коли мова йде про різні періоди синхронізації, перекіс годинника буде різним. Наприклад, у періоді k розглянемо $f = f_k$, $k = 0, 1, 2 \dots$, але $f_k \neq f_{k-1}$. Статистична обробка сигналів підходить до оцінки перекосу тактової частоти за відомих фіксованих затримок та невідомих фіксованих затримок. Підходи, що застосовують технологію обробки сигналів, застосовуються не тільки до випадку, коли випадковою затримкою є розподіл Гауса, але також застосовуються до випадку, коли випадкова затримка є експоненціальним розподілом. Отже, підходи порушують обмеження стандартної статистичної оцінки і навіть мають певні переваги при застосуванні до будь-якої моделі затримки. Коротше кажучи, при кожному процесі обміну повідомленнями, який би метод не застосовувався, ми завжди отримували незмінний перекіс годинника за один період.

Оскільки перекіс годинника f може бути отриманий в процесі обміну повідомленнями, можна припустити, що f відомо, і це фіксована константа за один період синхронізації. Тут ми помічаємо, що f в різні періоди синхронізації вважається різним. Отже (3), які мають лише два невідомі параметри, можна перетворити на

$$\begin{aligned} \frac{T_{2,k}}{f} &= T_{1,k} + \tau + X_k + \frac{\theta}{f}, \\ \frac{T_{3,k}}{f} &= T_{4,k} - \tau - Y_k + \frac{\theta}{f}. \end{aligned} \quad (4)$$

Щоб представити лінійну залежність між θ і τ , ми перетворюємо наведені рівняння в модель простору станів:

$$\begin{bmatrix} \frac{T_{2,k}}{f} - T_{1,k} \\ T_{4,k} - \frac{T_{3,k}}{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{f} \\ 1 & -\frac{1}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Рівняння (5) можна додатково спростити

$$\begin{bmatrix} U_k \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{f} \\ 1 & -\frac{1}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \end{bmatrix},$$

(6)

де $U_k = (T_{2,k}/f) - T_{1,k}$, $V_k = T_{4,k} - (T_{3,k}/f)$.

Визначення

$$x_k = \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{f} \\ 1 & -\frac{1}{f} \end{bmatrix},$$

$$y_k = \begin{bmatrix} U_k \\ V_k \end{bmatrix}, \quad v_k = \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \end{bmatrix},$$

(7)

так що (6) також можна записати як

$$y_k = Cx_k + v_k.$$

(8)

Вище, ніж було підтверджено, в цій роботі випадкова затримка підпорядковується незалежному ідентично розподіленому розподілу Гауса, тому передбачається, що її середнє дорівнює нулю, а кореляційна матриця коваріації - $E[v_k v_k^T] = R_k$, яка є діагональною матрицею. Але x_k невідомо; ми припускаємо, що поточний стан лінійно відноситься до стану в попередній інстанції часу. І через повільні зміни невідома держава побудувала динамічну модель Гаусса-Маркова:

$$x_k = x_{k-1} + \omega_{k-1},$$

(9)

де інтерференційна частина ω_{k-1} моделюється як розподіл Гауса із середнім нулем та коваріацією Q_{k-1} , де матриця кореляції - $E[\omega_{k-1} \omega_{k-1}^T] = Q_{k-1}$. Вище встановлено рівняння стану синхронізації годинника.

Відповідно до (8) та (9), картина процесу синхронізації годинника у k-му раунді обміну повідомленнями показана на рисунку 9. Ця картина просто описується наступним чином. У k-му раунді обміну повідомленнями отримується значення спостереження стану системи. За допомогою якогось методу оцінки стан системи оцінюється за значенням, а потім коригується логічний тактовий сигнал Вузла А, щоб досягти синхронізації між Вузлом А і Вузлом В. Як видно з малюнка, система, вбудована у Вузол А належить до системи зворотного зв'язку із замкнутим циклом,

але значення спостереження отримується шляхом обміну повідомленнями синхронізації двох вузлів.

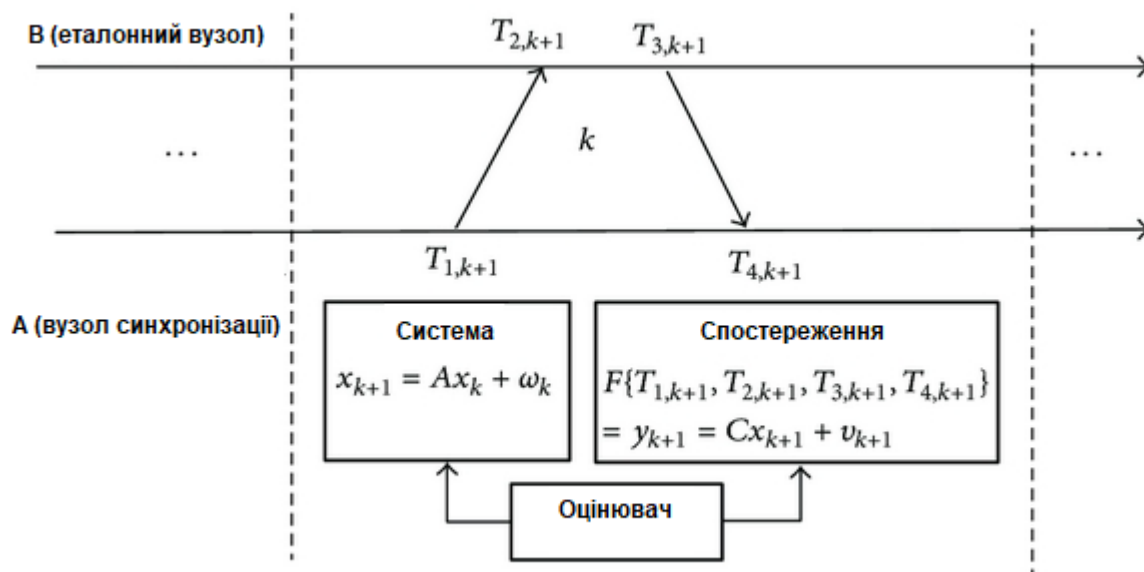


Рис. 9 Процес синхронізації годинника обміну повідомленнями.

Однак система синхронізації не дуже стабільна і на неї легко впливати шум. Здатність проти перешкод погана, і за наявності втрати пакетів на оцінку стану сильно впливає значення спостереження, що призводить до неточності оцінки стану і впливає на точність синхронізації.

Підводячи підсумок, нам потрібно знайти підхід до вирішення вищезазначених проблем. Рішення, яке розглядає проблеми управління та оцінки, коли сигнали датчика та сигнали виконавчого механізму передаються до різних підсистем через мережу, де пакет спостереження та управління може бути втрачений, і висуває нову теорію. У цій теорії архітектура системи замкненого циклу, заснована на протоколах, подібних до TCP, показана на рисунку 10, де двійкові випадкові змінні ν_t та γ_t вказують, успішно передаються пакети чи ні. Модель має порогове значення, що впливає на надійність мережі. Якщо воно нижче порогового значення, найкращий контролер не зможе зробити систему стабільною. Більше того, в моделі діє принцип розділення. Іншими словами, проектування та аналіз оцінювача та контролера можна розділити. Як результат, найкращим контролем є лінійна функція оціночного значення.

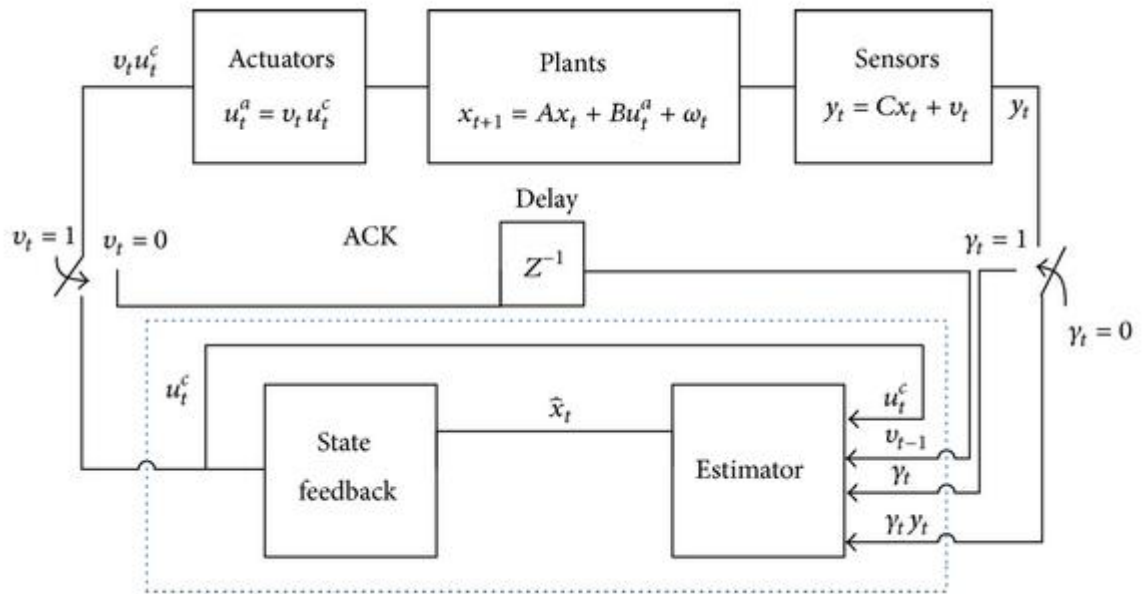


Рис. 10 Архітектура замкнутої системи через комунікаційну мережу за протоколами, подібними до TCP.

Модель синхронізації годинника в цій роботі являє собою систему зворотного зв'язку із замкнутим циклом, і значення спостереження отримується через ненадійну мережу, тож чи можливо, що синхронізація годинника аналізується відповідно до методу сучасної теорії управління чи ні. По-перше, додавши управління в модель синхронізації годинника, ми матимемо систему зворотного зв'язку із замкнутим циклом з управлінням. По-друге, деякі стратегії управління, які ми повинні вивчити, послаблять вплив шуму та покращать здатність синхронізації проти перешкод. Наприклад, навіть у суворих умовах багато кишенькових втрат; ми також використовуємо стратегію управління для здійснення синхронізації та гарантування високої точності. На основі побудованої моделі синхронізації годинника отримано попереднє управління додаванням моделі, як показано на рисунку 11.

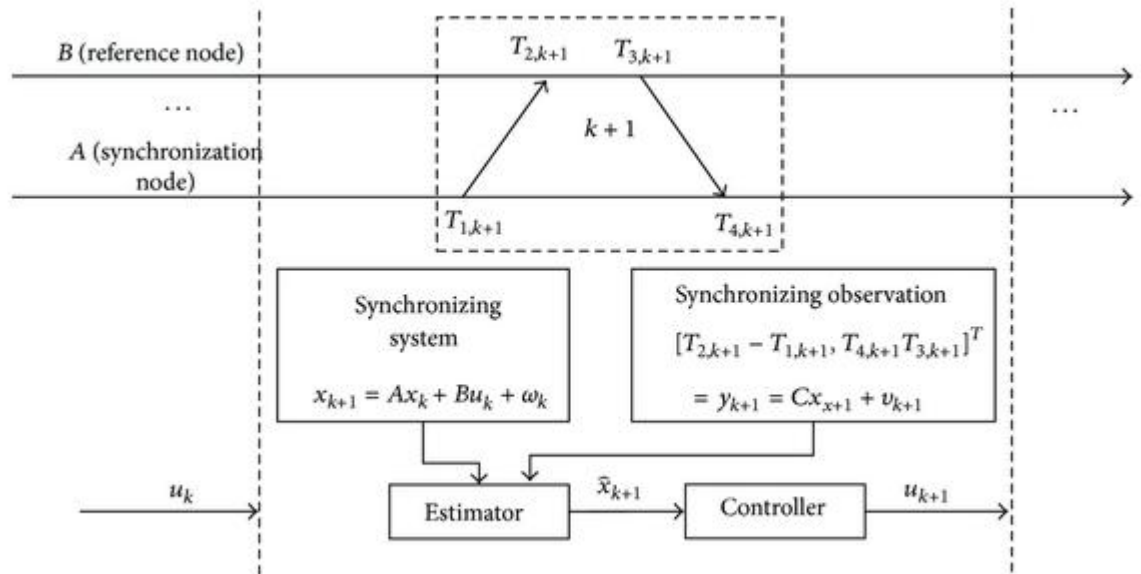


Рис. 11 Попередня модель додавання контролю.

3.4. Модель синхронізації, заснована на контролі

В останній частині пропонується ідея введення управління в модель синхронізації годинника, а потім ми детально проаналізуємо доцільність та переваги моделі синхронізації годинника на основі управління. Перш за все, як ввести контроль у нашу модель складно. Якщо дизайн нерозумний, ми не отримаємо того, що очікуємо. Тому ми повинні детально проаналізувати процес управління на основі синхронізації годинника.

Процес керування синхронізацією тактової частоти між двома вузлами зображений на рисунку 6. Це можна описати наступним чином (Вузол В є вузлом відліку, а Вузол А потрібно синхронізувати з Вузлом В).

1) Стан: в момент часу k , $\theta_{A,k}$ і $\theta_{B,k}$ означає абсолютне зміщення тактової частоти Вузла А та Вузла В відповідно. $\tau_{A,k}$ і $\tau_{B,k}$ визначаються як фіксована затримка (включає час передачі та час прийому, але час поширення не враховується, оскільки він занадто малий), що генерується, коли Вузол А та Вузол В, відповідно, виступають як відправник або одержувач в односторонньому обміні повідомленнями. $\theta_k = \theta_{A,k} - \theta_{B,k}$ означає відносне зміщення тактової частоти між Вузлом А і Вузлом В, а фіксована затримка в односторонньому обміні повідомленнями $\tau = \tau_{A,k} + \tau_{B,k}$. Ми вкладаємо ці два параметри в матрицю і визначаємо $x_k = [\tau, \theta_k]^T$. x_k в часі називається державою k .

2) Обмін повідомленнями за часом: для того, щоб синхронізувати Вузол А і Вузол В, Вузол А надсилає повідомлення про синхронізацію, яке переносить $T_{1,k}$ до Вузла В на $T_{1,k}$. Вузол В досягає цього повідомлення на $T_{2,k}$ і потім відповідає Вузлу А на $T_{3,k}$. Відповідне повідомлення містить як $T_{2,k}$ так і $T_{3,k}$. Нарешті, Вузол А отримує відповідне повідомлення на $T_{4,k}$. Зверніть увагу, що $T_{1,k}$ і $T_{4,k}$ - це локальний годинник Вузла А, тоді як $T_{2,k}$ і $T_{3,k}$ - місцевий годинник Вузла В як показано на пунктирній рамці на рисунку 12.

3) Втрата пакетів: у пунктирному кадрі дві пунктирні лінії зі стрілками представляють обмін повідомленнями часу між двома вузлами, а пунктирна лінія вказує на те, що пакет може бути втрачений у процесі обміну повідомленнями, де η_1 означає, чи є пакет, який Вузол Надсилання на вузол В передається успішно чи ні. $\eta_1 = 1$ якщо це вдало; інакше $\eta_1 = 0$. Так само, $\eta_2 = 1$ означає, що Вузол А успішно приймає повідомлення від Вузла В; інакше $\eta_2 = 0$. Після одного раунду обміну повідомленнями Вузол А отримає набір часових позначок $\{T_{1,k}, T_{2,k}, T_{3,k}, T_{4,k}\}$ коли $\eta_1\eta_2 = 1$, і ці позначки часу є значеннями спостереження y_k стану x_k в момент К, як показано на.

4) Отримання перекосу годинника (f): відповідно до отриманих позначок часу $\{T_{1,k}, T_{2,k}, T_{3,k}, T_{4,k}\}$, перекіс годинника f за один період синхронізації легко отримати за допомогою технології обробки сигналів або методу ідентифікації системи в області управління і це розглядається як незмінне протягом одного періоду синхронізації.

5) Процес синхронізації: відтепер ми можемо оцінити стан \hat{x}_k в момент К, використовуючи метод оцінки стану, знаючи перекося годинника f та отримуючи значення спостереження y_k , яке отримує Вузол А. Подальше використовуючи ідеї сучасної теорії управління, ми можемо генерувати оптимальний контроль u_k певної стратегії управління, і керування діє на логічний тактовий сигнал Вузла А, модифікуючи логічний тактовий сигнал Вузла А і роблячи абсолютне зміщення тактового значення Вузла А $\theta_{A,k} \rightarrow \theta_{A,k+1}$. На цей час відносно зміщення годинника для Вузла А і Вузла В становить $\theta_k \rightarrow \theta_{k+1}$ і $\theta_{k+1} < \theta_k$; а саме, $x_k \rightarrow x_{k+1}$;

б) Цикл синхронізації: повторюючи процес 5, після N кроків відносний зсув годинника досить малий.

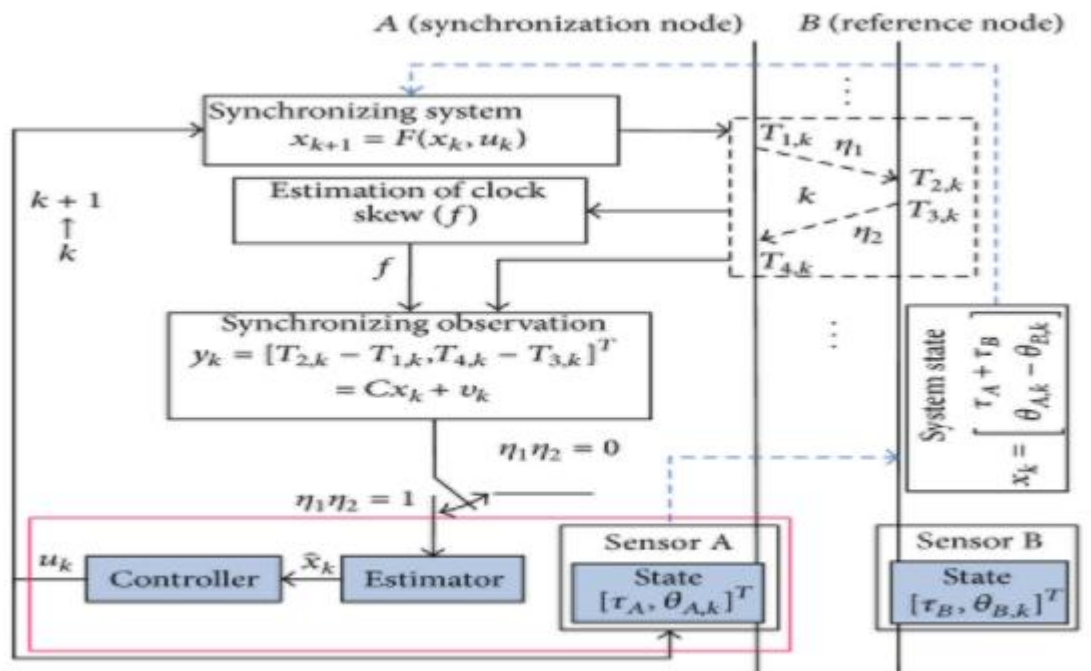


Рис. 12 Процес управління синхронізацією годинника.

У міру збільшення N , θ_N стає дедалі меншим. Нарешті, реалізована синхронізація годинника між двома вузлами.

Вище описаний процес синхронізації годинника у двох вузлах в деталях після введення управління. Тепер взаємозв'язок між станом та управлінням вважається рівнянням лінійного інваріанта часу (ЛІ). Отже, модель простору стану синхронізації годинника, заснована на елементі управління, виглядає наступним чином (незалежно від втрати пакетів):

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + \omega_k, \\
 y_k &= Cx_k + v_k,
 \end{aligned}$$

(10) (11)

де x_k називають станом системи в момент часу k , який включає два параметри $x_k = [\tau_k \ \theta_k]^T$, τ_k позначає фіксовану затримку двох вузлів у момент часу k , і θ_k позначає відносне зміщення тактової частоти двох вузлів; очевидно, x_{k+1} називають станом системи в той час $\bar{k} + 1$; y_k представлено значення спостереження, отримане в момент часу k ; u_k , який робить стан системи з часу k до $\bar{k} + 1$ часу, реалізуючи синхронізацію тактової частоти

між двома вузлами поетапно, показує керування, сформоване згідно з оцінкою стану; ω_k і v_k - це відповідно шум процесу та спостереження, які передбачаються гауссовими, некорельованими, білими, із середнім нулем та коваріацією $E[\omega_k \omega_k^T] = Q_k$ та $E[v_k v_k^T] = R_k$ відповідно; матриця коефіцієнтів $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}$; матриця коефіцієнта управління - це діагональна матриця B , де значення діагоналі означають контрольну вагу.

3.5 Модель синхронізації з втратою пакетів

З того, що було обговорено вище, хоча встановлено управління, засноване на моделі синхронізації тактової синхронізації без втрати пакетів, це далеко від вимог синхронізації тактової частоти в БСМ. Основна з причин полягає в тому, що в процесі обміну повідомленнями годинника між вузлами, в ідеальних умовах, обмін повідомленнями буде фактично отриманий; насправді існує низка ненадійних факторів, які часто призводять до втрати годинникового повідомлення при передачі. У цьому випадку слід враховувати ефект, спричинений втратою тактового повідомлення, тому ми повинні внести зміни в модель синхронізації годинника на основі управління.

Якщо ми розглядаємо обмін повідомленнями лише за один крок, то є лише дві речі: успіх чи невдача. Завдяки застосуванню механізму синхронізації годинника двостороннього обміну повідомленнями, де один крок включає в себе повідомлення обміну, яке два вузли посилають один одному, доки один раз відбувається збій зв'язку між двома вузлами, цей крок розглядається як обмін відмови, а саме втрати пакетів. Нехай γ_k буде випадковою величиною, яка вказує, викинутий пакет під час k чи ні, тому $\gamma_k = 0$ якщо пакет скинутий, і $\gamma_k = 1$, інакше. Але якщо розглянути весь процес обміну повідомленнями, втрата пакетів буде випадковою подією і відповідатиме випадковому розподілу Бернуллі з $P(\gamma_k = 1) = \lambda$. Але лише врахування втрати пакетів недостатньо, оскільки існування втрати пакета серйозно вплине на продуктивність системи і навіть на стабільність системи. Отже, ми повинні знайти межу втрат пакетів, щоб гарантувати надійну стабільність системи; а саме, помилка синхронізації часу може бути обмеженою і мати збіжність. Але з огляду на те, що вони глибоко вивчили проблему втрати пакетів і довели, що під передумовою гарантування стабільності системи, обмеження втрат пакетів і відповідні висновки дано,

цей документ забезпечує, що швидкість втрати пакетів в межах, щоб гарантувати стабільність системи.

Порівняно з моделлю, лише значення спостереження отримується завдяки обміну повідомленнями мережі між вузлами. Оскільки управління здійснюється в локальному вузлі, коли мережа не є надійною, існує втрата пакетів спостереження, але втрати пакетів управління не існує. Отже, рівняння спостереження модифікується таким чином:

$$y_k = \gamma_k (Cx_k + v_k). \quad (12)$$

Описуючи втрату пакетів, ми також розглянули інші форми опису, наприклад, для механізму синхронізації двостороннього обміну повідомленнями між двома вузлами, на кожному кроці рівняння спостереження включає два рази обміну повідомленнями. Якщо кожна одностороння передача повідомлення між двома вузлами події втрати пакетів не залежать одна від одної, і ймовірності не обов'язково рівні між собою, тому ми можемо використовувати матрицю для опису ситуацій спілкування, і це задається як

$$\gamma_k = \begin{bmatrix} \alpha_k & 0 \\ 0 & \beta_k \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де α_k і β_k - випадкові змінні Бернуллі, відповідно, що вказують, чи перекидається пакет з Вузла А у Вузол В чи ні, і чи пакет скидається з Вузла В у Вузол А чи ні, а їх діапазон дорівнює 0 і 1. У процесі спілкування, поки $|\gamma_k| = 1$, обмін повідомленнями успішний; інакше його скидають.

Також подія втрати пакетів була побудована для моделі ланцюга Маркова. Але як би не будували модель втрати пакетів, ми адаптуємо форму, описану в (12). Тому що він підходить для більшої форми та абстрактних випадків втрати пакетів.

Завдяки наведеному аналізу модель синхронізації годинника, заснована на контролі, встановила контраст із методами протоколу; у протоколах синхронізації для оцінки параметрів синхронізації в основному використовуються різні методи оцінки статистичного сигналу за допомогою обміну тактовими повідомленнями між вузлами, а потім логічні тактові частоти синхронних вузлів змінюються з цією оцінкою; отже, це вимагає меншої кількості обчислень і менше часу обчислення за одиничний крок.

Крім того, компенсацію на основі протоколу легко реалізувати, що стосується проблеми синхронізації тактової частоти з точки зору реалізації алгоритму, заснованого на техніці. Нарешті, компенсація також є різновидом контролю, але це не є оптимальним керуванням, а помилка синхронізації не є оптимальною, тоді як у методі управління, представленому в цій роботі, оптимальний контроль генерується з оцінкою, очевидно, за деяких стратегій управління, і тоді керування впливає на логічний такт синхронних вузлів. Переваги полягають у наступному.

1) Контролінг створює вплив факторів шуму, і що точність оцінки самого методу оцінки не є високою.

2) З тим самим кроком синхронізації (що відповідає деяким вимогам до помилки синхронізації), помилка синхронізації стохастичного оптимального управління при більших обчислювальних витратах менша в одиничному кроці, ніж у протоколу, що забезпечує більш високу точність синхронізації. За тих самих вимог точності, синхронні кроки, засновані на оптимальному керуванні, менші, ніж у протоколу. Отже, перший зменшує обмін мережевими пакетами для синхронізації та зменшує навантаження на мережевий зв'язок, що також є дуже важливим у бездротовій сенсорній мережі.

3) Підхід до синхронізації, заснований на стохастичному оптимальному контролі, є більш надійним та безпечним.

Незважаючи на те, що синхронізація годинника на основі оптимального управління має багато переваг, вона також має деякі недоліки.

(a) Компенсація, заснована на оптимальному управлінні, яка займається проблемою синхронізації годинника з точки зору теорії управління моделі простору станів, є складною для реалізації. А підхід вимагає великої кількості обчислень і призводить до тривалого часу обчислення в одиничному кроці.

(b) Підхід вимагає від вузлів датчиків платити більше споживання електроенергії, зменшуючи період виживання вузлів до певної міри.

Примітка. З точки зору реалізації інженерії управління теорії управління, розрахунок управління також може бути здійснений в автономному режимі, після того, як ідентифікація системи проводиться за параметрами мережі. Інтернет-таблиця пошуку доповнює контроль в режимі онлайн та в режимі реального часу, що певною мірою компенсує недоліки тривалого часу обчислень.

3.6 Висновки до розділу 3

В даному розділі було визначено поняття годинника в безпроводових сенсорних мережах, його функції та призначення, наведено математичне формулювання. Розглянув часову модель зсувом тактової частоти, також було в цьому розділі було розкрито питання затримки синхронізації в БСМ, розглянув модель стану синхронізації годинника. В 3 розділі пропонується ідея введення управління в модель синхронізації годинника, та детально проаналізована доцільність та переваги моделі синхронізації годинника на основі управління. Розглянув синхронізацію БСМ з втратою пакетів.

4. Стратегія управління при синхронізації годинника

Встановлена модель синхронізації годинника, заснована на контролі, і, як видно з рисунка 6, основним завданням синхронізації годин є завершення вибору та проектування оцінки та управління, якість яких безпосередньо впливає на точність синхронізації та стабільність системи. Оскільки встановлене спостереження (8) здійснюється згідно протоколу TPSN, а рівняння стану (10) базується на TCP, як і модель в, ця модель містить лише втрату пакету спостереження, а успішна передача пакета підтверджується в приймач. Отже, оцінка та управління моделлю синхронізації годинника, заснована на контролі, також застосовуються до принципу поділу.

Оцінка. Оскільки ми встановлюємо лінійну систему, оптимальним вибором оцінки параметрів стану лінійної системи є фільтрація Калмана. Фільтрація Калмана, яка потребує лише останньої оцінки стану та поточного спостереження і не зберігає великої кількості історичних даних, може оцінити сучасний стан, зменшуючи ємність сховища та складність обчислень і одночасно досягаючи мінімальної середньоквадратичної помилки. В результаті вибрано фільтрацію Калмана. Модифіковане ітераційне рівняння фільтрації Калмана є таким (наступні результати доведені в Додатку А):

$$\begin{aligned}
\hat{x}_{k+1|k} &= A\hat{x}_k + Bu_k, \\
\tilde{x}_{k+1|k} &= \hat{x}_{k+1|k} - x_{k+1} = A\hat{x}_k - \omega_k, \\
P_{k+1|k} &= AP_kA^T + Q_k, \\
\hat{x}_{k+1} &= \hat{x}_{k+1|k} + \gamma_{k+1}K_{k+1} [y_{k+1} - C\hat{x}_{k+1|k}], \\
\tilde{x}_{k+1} &= \hat{x}_{k+1} - x_{k+1} \\
&= (I - \gamma_{k+1}K_{k+1}C) \tilde{x}_{k+1|k} + \gamma_{k+1}K_{k+1}v_{k+1}, \\
P_{k+1} &= (I - \gamma_{k+1}K_{k+1}C) P_{k+1|k}, \\
K_{k+1} &= P_{k+1|k}C^T (CP_{k+1|k}C^T + R_{k+1})^{-1}.
\end{aligned}
\tag{14} \tag{15}$$

Контроль. Хоча ми створили модель простору станів синхронізації годинника, засновану на контролі, кількісний аналіз проблеми синхронізації годинника повинен додатково обговорювати стратегію управління. Оскільки синхронізація годинника враховує багато факторів, таких як точність синхронізації, час синхронізації, синхронний цикл та важливі енергетичні обмеження, які є лише частинами проблеми синхронізації годинника, що спричиняє проблему, а також через невизначеність зв'язку та затримки бездротового датчика, ці фактори становлять великі труднощі при дослідженні контролю синхронізації. У цій роботі вирішення проблеми є першим, що дає індекс для оцінки контролю; а саме, яке управління для синхронізації годин є найкращим з елементів керування? Далі аналізуються стратегії управління синхронізацією, окремо від різних вихідних точок, тобто одноетапного оптимального управління та глобального оптимального управління LQG.

4.1 Одноетапний оптимальний контроль

Так званий однокроковий оптимальний контроль означає, що в кожному контролі стан системи якомога швидше наближається до ідеального значення, а саме до цільового стану. Однак, одноступеневий оптимальний контроль, описаний у цій роботі, полягає в наступному: під оцінкою стану системи на основі фільтрації Калмана, отримання оптимального управління за допомогою одноетапної стратегії оптимального управління і, нарешті, досягнення синхронізації годинника між двома вузлами.

Ми розробляємо синхронну функцію індексу продуктивності, яка має наступний вигляд

$$\begin{aligned}
g_k &\triangleq g(x_k) = (x_k - z)^T D (x_k - z) \\
&= x_k^T D x_k + 2h^T x_k + z^T D z,
\end{aligned}
\tag{16}$$

де z - очікуване значення стану системи x_k і встановлення значення певною мірою є метою оптимального управління в один крок. Очевидно, тут потрібно досягти синхронізації годинника. D не є негативним, $\dot{h} = -Dz$, і $x_k^T D z$ є скаляром, тому $x_k^T \dot{D} z = z^T D x_k$. Якщо контролер u_k , ми маємо

$$x_{k+1} = r_k + B u_k,$$

$$\tag{17}$$

де $r_k = A x_k + \omega_k$, тоді очікування функції індексу продуктивності на наступному кроці є

$$\begin{aligned}
\hat{g}_{k+1|k} &\triangleq E[g(x_{k+1})] = E[g(r_k + B u_k)] \\
&= E[r_k^T D r_k + 2r_k^T D B u_k + u_k^T B^T D B u_k] \\
&\quad + 2E[h^T r_k + h^T B u_k] + z^T D_1 z \\
&= \hat{g}(r_k) + 2(\hat{r}_k^T D B + h^T B) u_k + u_k^T H u_k,
\end{aligned}
\tag{18}$$

де

$$\begin{aligned}
\hat{g}(r_k) &= E[r_k^T D r_k + 2h^T r_k] + z^T D_1 z, \\
\hat{r}_k &\triangleq E[r_k] = A \hat{x}_k, \\
H &= B^T D B.
\end{aligned}
\tag{19}$$

Оптимальний контроль на кроці k отримується за допомогою

$$\begin{aligned}
\text{Min} \quad & 2(\hat{r}_k^T D B + h^T B) u_k + u_k^T H u_k \\
\text{s.t.} \quad & u_k \in [\underline{u}, \bar{u}].
\end{aligned}
\tag{20}$$

Однак вищезазначене нелінійне квадратичне програмування дуже обчислювально, тому в подальшому розробляється умовне спрощене рішення для розрахунку оптимального управління. Якщо H є оборотним, не враховуючи обмеження контролю, то оптимальним управлінням на кроці k є

$$u_k^* = -H^{-1}(\hat{r}_k^T D B + h^T B)^T,$$

(21)

так довго, як $u_k^* \in [\underline{u}, \bar{u}]$.

Доказ. Оскільки

$$\frac{\partial}{\partial u_k} \hat{g}_{k+1|k} = 2Hu_k + 2(\hat{r}_k DB + h^T B)^T,$$

(22)

загальновідомо, що рішення для лінійного рівняння $(\partial/\partial u_k)\hat{g}_{k+1|k} = 0$ це u_k^* . Тоді

$$\left. \frac{\partial^2}{\partial u_k \partial u_k^T} \hat{g}_{k+1|k} \right|_{u_k^*} = 2H.$$

(23)

Легко довести, що матриця H невід'ємна. Отже, якщо умова, що $u_k^* \in [\underline{u}, \bar{u}]$ виконується, u_k^* є оптимальним управлінням; це є,

$$u_k^* = \arg \min_{u_k} \hat{g}_{k+1|k}.$$

(24)

4.2. Глобальний оптимальний контроль LQG

З точки зору глобальних показників ефективності, лінійний квадратичний оптимальний контролер зворотного зв'язку може досягти глобального оптимального управління, який являє собою набір впорядкованих послідовностей оптимального управління. Лінійний квадратичний оптимальний контролер заснований на космічній технології стану для розробки оптимального динамічного контролера. Модель системи представлена у формі простору станів. Цільовою функцією моделі є квадратична функція стану та управління, яка наближає стан до бажаного значення і одночасно обмежує енергоспоживання контролю. Оскільки в цій роботі розглядаються шум процесу та спостереження, він належить до лінійної квадратичної задачі оптимального управління Гауса.

Розглянемо таку функцію витрат:

$$J = \frac{1}{2} \left[x_N^T Q_0 x_N + \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{x}_k^T Q_1 \hat{x}_k + u_k^T Q_2 u_k) \right],$$

(25)

де \hat{x}_k та u_k вказують оцінку стану системи та оптимальний контроль синхронізації; x_N вказує остаточно бажане значення стану синхронізації, а встановлення значення певною мірою є метою оптимального управління в один крок. Очевидно, що тут потрібно досягти синхронізації годинника; тоді і $Q_0 \in R^{2 \times 2}$, і $Q_1 \in R^{2 \times 2}$ належать до позитивних напіввизначених дійсних симетричних матриць; нарешті $Q_2 \in R^{2 \times 2}$ є позитивною ознакою реальної симетричної матриці. Відповідно до лінійної квадратичної гауссової теорії оптимального управління маємо.

$$u_k = -L_k \hat{x}_k,$$

(26)

де матриця посилення

$$L_k = (B^T S_{k+1} B + Q_2)^{-1} B^T S_{k+1} A.$$

(27)

І S отримується за наступним рівнянням Ріккати:

$$S_k = A^T (S_{k+1} - S_{k+1} B (B^T S_{k+1} B + Q_2)^{-1} B^T S_{k+1}) A + Q_1,$$

$$S_N = Q_0.$$

(28)

Отже, на основі квадратичного показника ефективності управління та стану отримується глобальний оптимальний контроль. Тоді результат також показує, що матриця коефіцієнта підсилення L_k не має різниці з початковим значенням стану, тому її можна обчислити в автономному режимі та зменшити обсяг обчислення.

4.3. Різниця "Компенсація" –Корекція

Вище ми запропонували два види синхронізації годинника стохастичного оптимального управління. Але на практиці це не просто обмежується двома підходами, і ми можемо розробити стратегії управління, що відповідають вимогам відповідно до фактичного попиту та вимог параметрів. Але незалежно від того, який тип оптимального управління прийнятий, синхронізація годинника на основі стохастичного оптимального

управління полягає у зменшенні помилки синхронізації в синхронному циклі, а саме в підвищенні точності синхронізації, а не в реалізації проблеми стабільності синхронізації.

«Компенсація» Δ_s синхронізації годинника на основі стохастичного оптимального управління та синхронізації годинника на основі протоколу протиставляється.

(а) "Компенсація" Δ_s синхронізації годинника на основі одноетапного оптимального управління полягає в оптимізації кожного кроку стану синхронізації.

$$\Delta_s \triangleq u_k^* = -H^{-1}(\hat{r}_k DB + h^T B)^T, \quad (29)$$

де $H = B^T DB$, $\hat{r}_k \triangleq E[r_k] = A\hat{x}_k$.

(б) «Компенсація» Δ_l синхронізації годинника на основі глобального оптимального управління LQG полягає в оптимізації стану синхронізації в циклі синхронізації з глобальної точки зору, а не в розгляді одного кроку оптимуму.

$$\Delta_l \triangleq u_k = -L_k \hat{x}_k, \quad (30)$$

де $L_k = (B^T S_{k+1} B + Q_2)^{-1} B^T S_{k+1} A$ і S отримується за наступним рівнянням Ріккаті:

$$\begin{aligned} S_k &= A^T \left(S_{k+1} - S_{k+1} B (B^T S_{k+1} B + Q_2)^{-1} B^T S_{k+1} \right) A + Q_1, \\ S_N &= Q_0. \end{aligned} \quad (31)$$

(с) "Компенсація" Δ_p синхронізації годинника на основі протоколу має бути простою для технічної реалізації, а оцінка безпосередньо діє як компенсація.

$$\Delta_p = \hat{x}_k. \quad (32)$$

Насправді компенсацію, засновану на протоколі, можна також змоделювати як найбільш просте управління (без будь-якої корекції коефіцієнта підсилення), але це не найоптимальніший контроль.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

В даному розділі викладено маркетинговий аналіз перспектив впровадження БСМ в рух громадського транспорту, а також оцінено можливості її ринкового впровадження.

Опис ідеї проекту

Проект направлений на зменшення викидів шкідливих відходів в атмосферу, економію ресурсів та поліпшення трафіку у містах. Така система допомагає проаналізувати трафік, розробити нові маршрути та подолати загущеність транспортного потоку. Також ця система збору даних буде основою для розробки додатку який буде показувати кількість вільних місць у транспорті.

Таблиця 1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження БСМ в рух громадського транспорту допомагає вирішити такі питання як : екологічні проблеми та проблеми трафіку.	1.Зменшення непотрібних ресурсних витрат. 2.Зменшення викиду в атмосферу відходів. 3.Створити ідеальну транспортну систему для міста.	Завдяки впровадженню цієї технології, можна зробити аналіз транспортної системи на підставі потреб населення. Можливий розвиток в додаток на якому можна буде відстежувати кількість вільних місць.

Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 2

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ о п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Впровадження БСМ в рух громадського транспорту	Стандарт передачі даних Zigbee	Стандарт зв'язку IEEE 802.15.4, швидкість передачі даних 250Кбит/с.	Є доступними та безкоштовними для використання
2		Мова програмування Python	Існуючі бібліотеки, які можна використати для обробки інформації.	Є доступними та безкоштовними для використання
Обрана технологія реалізації проекту: мова програмування Python та стандарт передачі даних Zigbee				

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

При дослідженні ринкових можливостей, в першу чергу проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку. Дані наведені у таблиці нижче.

Таблиця 3

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

No п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1
2	Загальний обсяг продаж	?
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає

Враховуючи сьогоднішню необхідність вирішення загруженості громадського транспорту, ця технологія є перспективною та вигідною для входження.

Таблиця 4

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

No п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Оптимізація трафіку на дорогах	Громадський транспорт	Можна визначити стандарт передачі даних між сенсорами та використовувати інші методи формування даних.	<ul style="list-style-type: none"> Впровадження БСМ для оцінювання кількості людей на маршруті

Таблиця 5

Фактори загроз

No п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Відсутність зацікавленості у продукті	Успіх системи залежить від підтримки цього проекту державою, адже ця ідея буде доцільною якщо впроваджувати її в широкому плані.	Небажані витрати на розробку нового програмного забезпечення, та затрати на саму БСМ в усіх ТЗ в місті.

Висновки до стартапу

В даному розділі я запропонував впровадження БСМ в громадський транспорт, це допоможе вирішити екологічні проблеми, можна буде якісно аналізувати кількість транспорту що ходить. Також на основі цієї системи можна розробити додаток в якому можна буде відстежувати кількість вільних місць у транспорті.

Загальні висновки

Було запропоновано новий дослідницький підхід та підхід моделювання з точки зору теорії управління та кількісно проаналізував синхронізацію тактової синхронізації, яка називається методом синхронізації тактової синхронізації на основі управління. Цей метод спочатку проаналізував взаємозв'язок тактової частоти на основі двостороннього механізму обміну повідомленнями між вузлами в БСМ, будуючи модель простору станів синхронізації тактової частоти між двома вузлами. Потім автор використав ідеї сучасної теорії управління та представив управління в міру встановлення режиму простору станів для кількісного аналізу питання синхронізації годинника з точки зору управління. Нарешті, детально обговорено два види стратегій управління: одноетапний оптимальний контроль (на основі поточної інформації про час) та оптимальний контроль LQG (на основі загальної інформації).

На початку стаття використовує два вузли як плацдарм для детального моделювання та аналізу. Для кількох вузлів у (БСМ) розміри системної матриці розширюються відповідно до кількості вузлів. Цей метод також може аналізувати проблему синхронізації годинника. Тим часом автор припустив, що випадкова затримка часу підпорядковується гауссовому розподілу. Але для статистичної техніки обробки сигналів, застосованої до синхронізації тактової частоти в БСМ, оцінка параметрів була розширена з розподілу Гауса на загальний випадковий розподіл. Тому у випадку підпорядкування іншим випадковим розподілам застосовується також метод синхронізації годинника, заснований на контролі. Результати моделювання показують, що запропонований метод синхронізації годинника, заснований на контролі, має вищу точність і швидший коефіцієнт конвергенції, ніж класична синхронізація TPSN; більше того, після зближення помилки синхронізації, перша має менші коливання помилки синхронізації; ефективність попередніх перешкод сильніша. Крім того, відповідно до особливостей мережі (затримка, втрата пакетів, номер вузла тощо) та цілей управління, автор створив розумні функції індексу продуктивності та розробив різні стратегії управління, щоб задовольнити загальний попит на зв'язок та управління. Крім того, різні стратегії управління мають свої переваги; однокрокове оптимальне управління забезпечує будь-яку синхронізацію годинника якнайшвидше рухається до цілі, а швидкість конвергенції є найшвидшою, так що необхідний час синхронізації є найкоротшим, тоді як оптимальний контроль LQG на основі загальної

інформації підтримує плавний і стабільний контроль над синхронізація годинника. Отже, відповідно до різних потреб насправді, слід обрати відповідну стратегію управління.

1. D. Mills, Internet time synchronization: the network time protocol, *IEEE Transactions on Communications*, 39 (1991), 1482–1493.
2. S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. Srivastava, Timing synch protocol for sensor networks, in *Proceedings of 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp. 138–149. ACM, 2005.
3. N. Freris and P. Kumar, Fundamental limits on synchronization of affine clocks in networks, in *Proceedings of 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 921–926. IEEE, 2009.
4. S. Ganeriwal, D. Ganesan, H. Shim, V. Tsitsis, and M. B. Srivastava, Estimating clock uncertainty for efficient duty-cycling in sensor networks, in *Proceedings of the SenSys*, pp. 130–141. ACM, 2005.
5. J. V. Greunen and J. Rabaey, Lightweight time synchronization for sensor networks, in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 11–19. ACM, 2005.
6. Akyildiz I.F. Wireless Sensor Networks /I.F. Akyildiz// Tutorial at IEEE INFOCOM. — 2005. — March 14.
7. F. Cristian, Distributed counting, in *Probabilistic Clock Synchronization*, pp. 146–158. Springer Verlag, 1989.
8. K. Arvind, Probabilistic clock synchronization in distributed systems, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 5 (1994), 474–487.
9. J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts, in *Proceedings of the 5th Symposium on Operating System Design and Implementation*, pp. 147–163. ACM, 2004.
10. K. Romer, Time synchronization in ad hoc networks, in *Proceedings of ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 173–182. ACM, 2001.
11. J.R.Vig, Introduction to quartz frequency standards, Technical Report SLCETTR-92-1, Army Research Laboratory Electronics and Power Sources Directorate, 1992.
12. K.-L. Noh and E. Serpedin, Pairwise broadcast synchronization for wireless sensor networks, in *Proceedings of the IEEE International Workshop: From Theory To Practice in Wireless Sensor Networks*, pp. 1–6. IEEE, 2007.
13. H. Kopetz and W. Ochsenreiter, Clock synchronization in distributed realtime systems, *IEEE Transactions on Computers*, 36 (1987), 933–939.
14. J. L. Hill and D. E. Culler, Mica: a wireless platform for deeply embedded networks, *IEEE Micro*, 22 (2002), 12–24.
15. B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey, *Ad-Hoc Networks*, 3 (2008), 281–323.
16. S. Kunniyur and S. Narasimhan, Modeling the effect of network parameters on delay in wireless ad hoc networks, in *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 341–349. IEEE, 2005.
17. F. Cristian. Probabilistic Clock Synchronization. *Distributed Computing*, 3:146–158, Springer-Verlag, 1989.
18. M. Mock, R. Frings, E. Nett, and S. Trikaliotis. Continuous Clock Synchronization in Wireless Real-time Applications. *Proc. 19th IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS-00)*, pp. 125–133, Oct. 2000.

19. S. Ping. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. *Intel Research, IRB-TR-06- 013*, June 2006.
20. J. Elson, L. Girod, and D. Estrin. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. *Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002)*, Vol 36, pp. 147–163, 2002.
21. S. PalChaudhuri, A. Saha, and D. B. Johnson. Probabilistic Clock Synchronization Service in Sensor Networks. Technical Report TR 03-418, Department of Computer Science, Rice University, 2003.
22. W. Su, I. Akyildiz, Time-Diffusion Synchronization Protocols for Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007.
23. Q. Li and D. Rus. Global Clock Synchronization in Sensor Networks, *Proc. IEEE Conf. Computer Communications (INFOCOM 2004)*, Vol. 1, pp. 564–574, Hong Kong, China, Mar. 2004.
24. M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003)*, pp. 1266–1273, 2003.
25. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey, *Journal Ad Hoc Networks*, Vol. 7 Issue 3, May, 2009.
26. Коваленко І.Г., Романюк В.А., Діянчук І.М. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ. [Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 2 – 2012](#)
http://www.viti.edu.ua/files/rom/2011/4_2011.pdf
27. [Fengyuan Gong](#); [Mihail L. Sichitiu](#). [On the Accuracy of Pairwise Time Synchronization](#), [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2017
Pages: 2664 – 2677.
28. [Ali Al-Shaikhi](#); [Ahmad Masoud](#). [Efficient, Single Hop Time Synchronization Protocol for Randomly Connected WSNs](#) *IEEE Wireless Communications Letters* , 2017, Pages: 170 – 173.
29. [Md Asgar Hossain](#); [Md Mukit](#). [Experimental investigation and analysis of clock model and sensor networks agents time synchronization](#), [International Conference on Electrical & Electronic Engineering \(ICEEE\)](#), 2015, Pages: 145 - 148
30. Варгаузин В. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / В. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. — 2005. — № 6.
31. Васенин В.А. Математические модели управления трафиком в Интернете: новые подходы на основе схем TCP/AQM / Васенин В.А., Симонова Г.И. // Автоматика и телемеханика. — 2005. — №8.
32. Горяева С.Н. Особенности построения сенсорных сетей / С.Н. Горяева // 2-а міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційні системи. Пролемі та тенденції розвитку.»: Зб. матеріалів конференції — Х.: ХНУРЕ, — 2007. — С. 145—146.
33. Коваленко І.Г. Энергозберігаючі методи множинного доступу в безпроводних сенсорних мережах: збірник матеріалів V науково-технічної

конференції „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” / – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2010. – С. 141 – 142.

34. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и беспроводных сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // Электросвязь. — 2006. № 6.

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

36. Алгулиев Р.М. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / Р.М.Алгулиев, Т.Х. Фаталиев, Б.С. Агаев, Т.С. Алиев // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. — 2007. — № 4. — С. 27—32.

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

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

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

40. GPS Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.pnt.gov/public/docs/2008/spsps2008>

41. Esra Saraç, and Selma Ayúe Özel, “An Ant Colony Optimization Based Feature Selection for Web Page Classification,” The Scientific World Journal, vol. 2014, pp. 1–16, 2014.

42. M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Coloni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), vol. 26, no. 1, pp. 29-41, Feb 1996.

43. Y. Lu, G. Zhao and F. Su, "Adaptive ant-based dynamic routing algorithm," Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), 2004, pp. 2694-2697 Vol.3.