

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ___ » _____ 2023 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

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

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Вдосконалення алгоритмів застосування технології MIMO у
мобільних сенсорних мережах»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-91

Рубін Богдан Андрійович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС, д.т.н., професор,

Лисенко Олександр Іванович _____

Рецензент:

Професор кафедри ІКТС НН ІТС, д.т.н., професор,

Скулиш Марія Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цієї дипломної роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2023 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Рубіну Богдану Андрійовичу

1. Тема роботи : «Вдосконалення алгоритмів застосування технології МІМО у мобільних сенсорних мережах», керівник роботи Лисенко Олександр Іванович, професор кафедри ТК НН ІТС ,затверджені наказом по університету від «22» травня 2023 р. №1884-с
2. Строк подання студентом роботи 13 червня 2023р.
3. Вихідні дані : Робота МАС-протоколів, модель системи МІМО, канал в МССМІМО, сервіс системи зв'язку.
4. Зміст роботи:
 - Огляд сучасних безпроводних технологій
 - Система зв'язку з декількома передавальними і декількома прийомними антенами (МІМО)
 - Багатоканальне кооперативне мімо для безпроводних
 - Сенсорні мережі з МАС протоколом
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)
 - 1) Зміст дипломної роботи
 - 2) Мета роботи
 - 3) Переваги та огляд МІМО

- 4) Введення протоколу WSNs та MAC
- 5) Оцінка енергетичної ефективності
- 6) Дослідження
- 7) Результати досліджень
- 8) Висновки.

6. Дата видачі завдання «21» жовтня 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Система зв'язку з декількома передавальними і декількома прийомними антенами (MIMO)	21.10.2022-28.10.2022	виконано
2	Формування кластеру і вибір кооперативного MIMO зв'язку	31.10.2022-22.11.2022	виконано
3	Призначення каналів для кооперативних MIMO зв'язків	27.11.2022-12.02.2023	виконано
4	Аналіз енергетичної ефективності	15.03.2023-17.04.2023	виконано
5	Оцінка продуктивності протоколу MССMIMO і порівняємо її з протокол СMIMO	18.04.2023-05.06.2023	виконано

Студент

Богдан РУБІН

Керівник роботи

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 66 сторінок, 29 рисунка та 2 таблиці. Було також використано 33 джерел.

Метою роботи є опанування методики , процедури , способи та алгоритми застосування технології МІМО у мобільних сенсорних мережах.

Об'єктом дослідження є безпроводові сенсорні мережі.

Предметом дослідження є розвиток способів застосування технології МІМО (Multiple-Input Multiple-Output) у безпроводових сенсорних мережах. Це означає вивчення та покращення методів передачі та отримання даних у безпроводових сенсорних мережах з використанням МІМО-технології.

В ході даної роботи були досліджені алгоритми та протоколи, що використовуються для ефективної роботи МІМО-систем у безпроводових сенсорних мережах.

Результатом роботи чисельний аналіз і моделювання, які демонструють, що МССМІМО може досягти значного покращення енергоефективності і пропускної здатності системи в порівнянні з іншими схемами.

Ключові слова: МІМО , сенсорні мережі , енергоефективність, пропускна здатність , технологія ZigBee, затримка , шуми , технологія МІМО.

ABSTRACT

The work contains 66 pages, 29 figures and 2 tables. 33 sources were also used.

The aim of the work is to master the methodology, procedures, methods and algorithms of MIMO technology application in mobile sensor networks.

The object of research is wireless sensor networks.

The subject of research is the development of methods of applying MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology in wireless sensor networks. This means studying and improving data transmission and reception methods in wireless sensor networks using MIMO technology.

In the course of this work, algorithms and protocols used for efficient operation of MIMO systems in wireless sensor networks were investigated.

The results of the work are numerical analysis and simulations that demonstrate that MCCMIMO can achieve a significant improvement in energy efficiency and system throughput compared to other schemes.

Keywords: MIMO, sensor networks, energy efficiency, bandwidth, ZigBee technology, delay, noise, MIMO technology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	12
ОГЛЯД СУЧАСНИХ БЕЗПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	12
1.1 Особливості безпроводних сенсорних мереж.....	13
1.2 Архітектура сенсора.....	16
1.3 Сенсорні мережі і суспільство	19
Висновки:	20
РОЗДІЛ 2	22
СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ З ДЕКІЛЬКОМА ПЕРЕДАВАЛЬНИМИ І ДЕКІЛЬКОМА ПРИЙОМНИМИ АНТЕНАМИ (MIMO)	22
2.1 Системи зв'язку з декількома антенами.....	22
2.2 Математична модель системи MIMO	24
Висновки:	26
РОЗДІЛ 3	28
БАГАТОКАНАЛЬНЕ КООПЕРАТИВНЕ MIMO ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ З MAC ПРОТОКОЛОМ	28
3.1 Введення MAC протоколу.....	28
3.1.1. Робота MAC-протоколів.....	28
3.1.2. Роботи сумісного проектування MAC рівня	29
3.1.3. Споріднені роботи на фізичному рівні	30
3.2 Формування кластеру і вибір кооперативного MIMO зв'язку	32
3.2.1. Фаза виявлення сусідів	33
3.2.2. Фаза виявлення ваги.....	34
3.2.3. Фаза формування кластера.....	35
3.2.4. Фаза виявлення сусідніх кластерів.....	36
3.2.5. Фаза вибору кооперативного MIMO зв'язку.....	37
3.3 Призначення каналів в MССMIMO.....	39
3.3.1. Призначення каналів для кластерів.....	40
3.3.2. Призначення каналів для кооперативних MIMO зв'язків.....	41
3.4 Проміжний контроль доступу.....	43
3.4.1. Фаза від кластерних членів до кластерних головок	44
3.4.2. Фаза від кластерних головок до кластерних членів	45
3.4.3. Фаза міжкластерних зв'язків.....	46
3.5 Аналіз Енергетичної Ефективності	47

3.5.1. Формування кластерів і виділення затрат каналу	48
3.5.2. Енергетична ефективність внутрьо-кластерного зв'язку.....	48
3.5.3. Енергетична ефективність міжкластерного зв'язку	48
3.6 Оцінка ефективності	51
3.6.1. Рух усіх кластерів до потоку	52
3.6.2. Однополюсний міжкластерний рух.....	54
3.6.3. Вплив параметрів системи	57
Висновки:	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

APTEEN	(AdaptiveThresholdsensitiveEnergyEfficientNetwork)– протоколзадаптивнимпорогом енергоефективності
AWACS	(AirborneWarningandControlSystem)– авіаційнасистемаранньогопопередженнятауправління
BER	(biterrorrate)–коефіцієнтпомилковихбітів
CH	(clusterhead) –керівниккластеру
CSMA-CA	(CarrierSenseMultipleAccesswithCollisionAvoidance)– доступзконтролемнесучої/запобіганням колізій
FSK	(FrequencyShift Keying)–частотнаманіпуляція
GAF	(GeographicAdaptiveFidelity)– географічноадаптивнийпротокол
GEAR	GeographicandEnergyAwareRouting– географічнотаенергетичновизнанамаршрутизація
GPS	(GlobalPositioningSystem)– системаглобальногопозиціонування
IP	(Internet Protocol) – мережевий протокол
LEACH	(LowEnergyAdaptive ClusteringHierarchy)– ієрархічнийалгоритмадаптивної кластеризаціїзнизькимрівнемвикористанняенергії
MAC	(MediaAccessControl)– рівеньуправліннядоступомдосередовища
NGN	(NextGenerationNetwork)–мережінаступногопокоління
OSI	(Open Systems Interconnection Basic Reference Model) – базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PEGASIS	(Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems) – алгоритм ефективного збору в сенсорних системах
PSK	(phase-shift keying) – фазова маніпуляція10
SNR	(signal-to-noise ratio) – відношення сигнал/шум

SOP	(Self-Organization Protocol) – самоорганізований протокол
SPIN	(Sensor Protocols for Information via Negotiation) – сенсорні протоколи для інформації через переговори
TEEN	(Threshold sensitive Energy Efficient Network) – протокол з порогом чутливості енергоефективної мережі
TDMA	(Time Division Multiple Access) – доступ з розділенням у часі SoSuS (Sound Surveillance System) – звукова система спостереження
WSN	(Wireless Sensor Network) – безпроводова сенсорна мережа
MIMO	(Multiple-input multiple-output) система зв'язку з безліччю входів і виходів
MAC	(medium access control) контроль доступу до середовища
БС	базовастанція
ДПД	добровільнапожежнадружина
ЕКГ	Електрокардіографія
КК	керівниккластеру

ВСТУП

Сучасні технології становлять необхідну складову життя як окремої особи, так і суспільства в цілому. В сучасних умовах майже неможливо уявити собі підприємство, яке б не користувалося досягненнями технологічного прогресу. Особливо великий вплив сучасні технології мають на комп'ютерну індустрію, яка, хоч і є молодого, але вже зробила величезні кроки в розвитку комп'ютерних технологій. Поєднання комп'ютерів і засобів зв'язку має значний вплив на принципи організації комп'ютерних систем. Використання комп'ютерних мереж є важливим елементом сучасного бізнесу і організацій. Ці мережі мають декілька основних цілей, які сприяють ефективному функціонуванню організацій:

Спільне використання ресурсів: Комп'ютерні мережі дозволяють забезпечити доступ до програм, обладнання та даних для будь-якого користувача в мережі. Це сприяє ефективній роботі та співпраці між співробітниками, які можуть легко обмінюватися інформацією і використовувати загальні ресурси.

Надійність і резервування: Мережі можуть бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити високу надійність за допомогою альтернативних джерел інформації. Це означає, що при відмові одного з'єднання інші з'єднання продовжують працювати, забезпечуючи безперебійний доступ до ресурсів.

Економія коштів: Використання менших комп'ютерів у мережі може бути економічно вигіднішим, ніж використання великих централізованих систем. Менші комп'ютери часто мають краще співвідношення ціна-продуктивність, а їх розташування по всій мережі допомагає знизити загальні витрати на обладнання.

Масштабованість: Мережі можуть бути легко масштабовані, що означає, що система може збільшувати продуктивність залежно від зростання навантаження. Це досягається шляхом простого додавання процесорів або інших ресурсів до мережі.

Передача інформації: Комп'ютерні мережі є потужним засобом зв'язку між віддаленими співробітниками організації. Вони дозволяють швидко та ефективно передавати інформацію, спілкуватися, співпрацювати та обмінюватися даними без необхідності фізично перебувати в одному місці.

Одним з завдань курсової роботи є мінімізація використовуваних IP-адрес. Це досягається шляхом розрахунку та проектування кабельної системи з використанням певних вимог, зокрема, забезпеченням доступу користувачів до ресурсів всіх комп'ютерів, що об'єднані в одну мережу. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати ресурси та забезпечувати ефективну комунікацію в мережі.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ БЕЗПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На сьогоднішній день бездротові мережі є необхідною складовою сучасних телекомунікацій. Бездротовий зв'язок має багато переваг, таких як мобільність, легкість встановлення та перебудови, швидкий доступ до Інтернету та можливість підключення до різних типів мереж. Завдяки цим перевагам, кількість користувачів бездротових технологій зростає щодня. Ринок телекомунікацій пропонує широкий спектр бездротових технологій, і існує багато компаній, що пропонують власні рішення.

Деякі приклади бездротової передачі даних включають такі технології, як Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, EDGE та ZigBee. Вибір конкретної технології залежить від вимог, які ставляться до мережі. Критерії включають пропускну здатність, частотний діапазон, максимальну кількість вузлів у мережі та інші. У таблиці 1.1 наведено порівняльні характеристики деяких бездротових технологій.

Таблиця 1.1

Технологія безпроводного зв'язку (стандарт)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)
Частотний діапазон, ГГц	2,4-2,483	2,4-2,483	2,4-2,483
Пропускна здатність, кбіт/с	250	11000	723,1
Розмір стека протоколу, кбайт	32-64	Більше 1000	Більше 250
Час безперервної автономної роботи від батареї	100-1000	0,5-5	1-10
Максимальна кількість вузлів	65536	10	7
Діапазон дії, м	10-100	20-300	10-100
Області застосування	Віддалений моніторинг управління ліній	Передача мультимедійної інформації	Заміщення проводного з'єднання

З таблиці 1.1 виходить, що технологія ZigBee, яка базується на стандарті IEEE 802.15.4, надає найбільшу максимальну кількість вузлів у мережі, а також демонструє найтривалішу автономну роботу від батареї. Ця технологія також відома як "Сенсорні мережі" (англ. WSN - Wireless Sensor Network).

1.1 Особливості безпроводних сенсорних мереж

Особливості безпроводних сенсорних мереж полягають у їх розподіленій та самоорганізованій структурі. Вони складаються з великої кількості малогабаритних та економічних пристроїв, які здійснюють обмін інформацією по безпроводному зв'язку. Важливою особливістю таких мереж є їх висока стійкість до відмов окремих елементів, що дозволяє їм продовжувати працювати безперебійно навіть при відмові деяких пристроїв.

Сенсорні мережі використовуються в різних галузях і мають різноманітні застосування. Вони забезпечують можливість моніторингу та контролю за об'єктами, які вимагають постійного спостереження. Ці мережі можуть бути самостійними системами збору, обробки та передачі інформації, і мають здатність до ретрансляції повідомлень через сусідні вузли. Однією з ключових особливостей сенсорних мереж є їх безпроводна комунікація. Вони не потребують постійної інфраструктури, яка належить оператору чи провайдеру.

Кожен пристрій в мережі може виконувати не тільки роль кінцевого вузла, але й транзитного вузла для передачі інформації. Повідомлення в сенсорних мережах передаються шляхом перенаправлення до найближчого вузла, а не до центральної базової станції. Це дозволяє ефективно управляти маршрутизацією та забезпечувати ефективну передачу даних. Такі мережі називаються багатокроковими, оскільки передача інформації відбувається через кілька проміжних вузлів.

Розвиток технологій безпроводних сенсорних мереж почався у середині 1990-х років і продовжується до сьогодні.[5] З появою дешевих елементів бази мікроелектроніки, ці мережі стали більш доступними і ефективними. Вони знайшли широке застосування у різних сферах, включаючи наукові дослідження, промисловість, медицину, охорону довкілля та інфраструктурні системи.

Безпроводні сенсорні мережі є важливим інструментом для збору та обробки інформації в реальному часі. Вони відкривають нові можливості для моніторингу і управління різними процесами, що дозволяє покращити ефективність та забезпечити надійність в різних галузях діяльності.

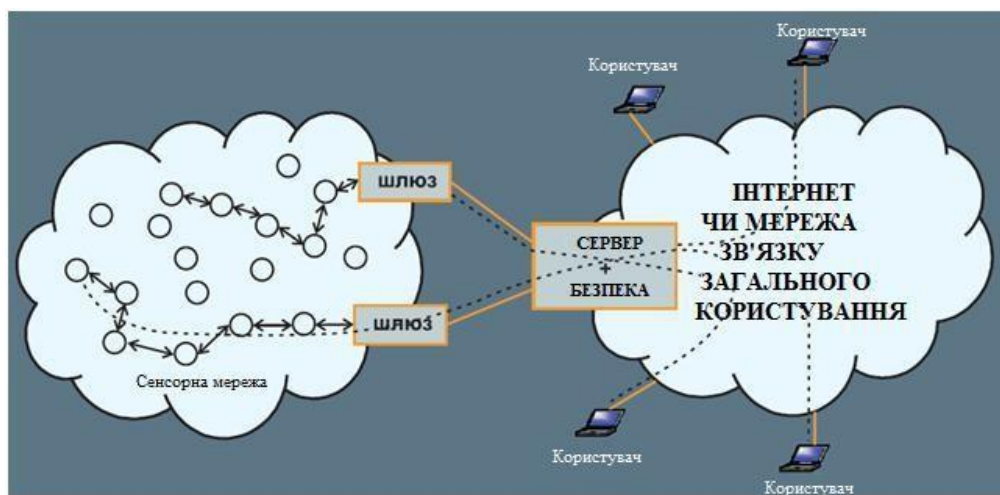


Рис.1.1 Приклад під'єднання сенсорів мережі

Для побудови ефективних і надійних сенсорних мереж необхідно враховувати ряд аспектів, які ви згадали. Давайте розглянемо кожен з них детальніше:

1) Стійкість при несправності: Сенсорна мережа повинна бути здатна продовжувати свою роботу навіть у разі відмови окремих сенсорів або групи сенсорів. Це можливо за допомогою протоколів маршрутизації та алгоритмів управління, які забезпечують швидку адаптацію мережі до нової фізичної топології. Наприклад, можуть використовуватися маршрутизаційні

алгоритми, які автоматично перенаправляють трафік через доступні маршрути при відмові окремих сенсорів.

2) Масштабованість: Сенсорні мережі можуть змінювати розмір залежно від потреб і розвитку системи. Важливо забезпечити, щоб збільшення кількості сенсорів не перевантажувало мережеві ресурси. Наприклад, можна використовувати протоколи маршрутизації, які динамічно адаптуються до змін у топології мережі, забезпечуючи оптимальний шлях для передачі даних.

3) Топологія: Зміна топології сенсорної мережі може бути спричинена введенням нових сенсорів або виходом існуючих сенсорів з ладу. Важливо мати протоколи, які дозволяють ефективно змінювати топологію мережі, без перерви в роботі системи. Наприклад, можна використовувати протоколи автоматичної конфігурації мережі, які дозволяють сенсорам самостійно знаходити і підключатися до доступних вузлів.

4) Обмеження апаратного забезпечення і безпроводного інтерфейсу: У сенсорних мережах компактність і енергоефективність є ключовими вимогами. Необхідно розробляти сенсори, які мають мінімальний розмір і споживання енергії, щоб забезпечити їх широке комерційне використання. Також потрібно враховувати характеристики безпроводного інтерфейсу, який використовується для передачі даних між сенсорами та базовою станцією. Вибір відповідної безпроводної технології залежить від конкретних потреб мережі.

5) Споживання енергії: Значенням життєвого циклу сенсорів є їх здатність працювати на обмежених джерелах живлення. Енергоефективність є однією з ключових характеристик, яку необхідно враховувати при розробці сенсорних мереж. Це можна досягти за допомогою оптимізації алгоритмів роботи сенсорів, використанням енергозберігаючих протоколів та механізмів сну, а також ефективним управлінням джерелами живлення.

б) Урахування цих аспектів допоможе забезпечити побудову ефективних і надійних сенсорних мереж. Розробка і впровадження таких мереж вимагають детального планування, проектування та тестування для досягнення найкращих результатів.

1.2 Архітектура сенсора

Сенсорні датчики складаються з апаратної і програмної частин, аналогічно іншим телекомунікаційним вузлам. Зазвичай, сенсорні датчики включають наступні підсистеми: систему прийому, обробки даних, моніторингу, комунікаційну систему та джерело живлення (див. рисунок 1.2).

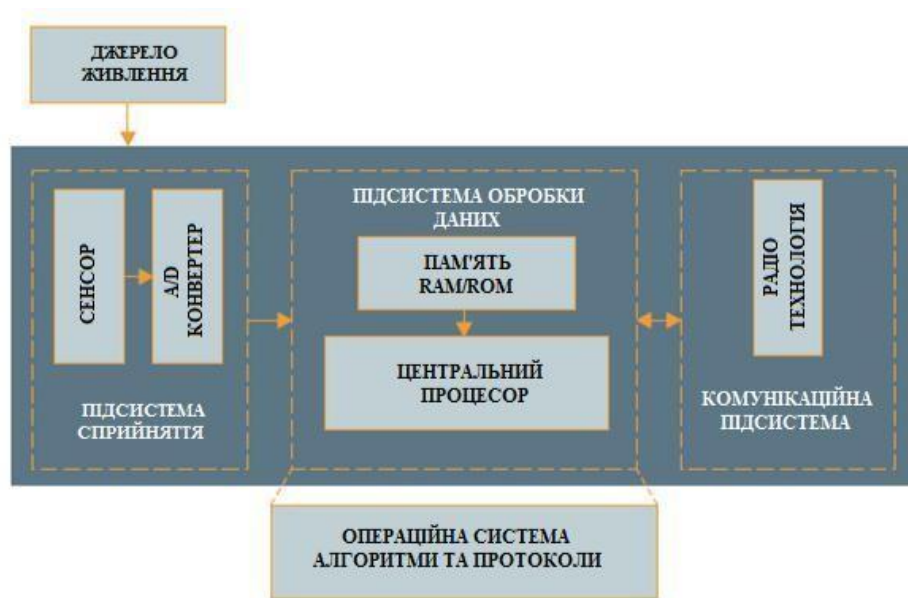


Рис. 1.2: Загальна архітектура сенсора

Система сприйняття зазвичай складається з аналогового пристрою, який зчитує певну статистику, і аналого-цифрового перетворювача.

Система обробки даних містить центральний процесор і пам'ять, що дозволяють зберігати не лише дані, що отримані від сенсора, а й службову інформацію, необхідну для належної роботи комунікаційної підсистеми.

Система моніторингу дозволяє сенсорі збирати дані про навколишнє середовище, такі як вологість, температура, тиск, магнітне поле, хімічний

склад повітря тощо. Крім того, сенсор може бути оснащений гіроскопом та акселерометром, що дозволяє побудувати систему позиціонування.

Прогрес в бездротовому зв'язку та мініатюризація мікросхем відкривають нові перспективи в галузі інформаційно-комп'ютерних технологій.

Крім традиційних мереж, існують складніші протоколи маршрутизації, де вибір наступного вузла залежить від його характеристик, таких як рівень енергії та надійність. Ситуацію ускладнює рухомість вузлів у бездротових сенсорних мережах, що призводить до динамічних змін у топології мережі.
[7]

При розробці сенсорів як мініатюрних телекомунікаційних пристроїв (об'ємом не більше одного кубічного сантиметра) потрібно враховувати багато технічних аспектів. Частота центрального процесора повинна бути не менше 20 МГц, обсяг оперативної пам'яті - не менше 4 КБ, а швидкість передачі - не менше 20 Кбіт/с.

Оптимізація апаратної частини може зменшити розміри сенсора, але при цьому підвищить його вартість. Операційну систему (ОС) необхідно оптимізувати з урахуванням архітектури використовуваного центрального процесора. Наразі широко поширена ОС з відкритим кодом - Tiny OS, яка дозволяє гнучко управляти сенсорами різних виробників.

У галузі мережевої взаємодії обмежені джерела живлення в сенсорах ставлять серйозні обмеження на використання радіотехнологій у сенсорних мережах. Також варто відзначити, що обмежена продуктивність центрального процесора унеможливує використання стандартних IP-протоколів маршрутизації, оскільки складність обчислення оптимального маршруту перевантажує центральний процесор.

На сьогоднішній день розроблено багато спеціалізованих протоколів маршрутизації для сенсорних мереж. Розробка технології передачі даних у сенсорних мережах є одним з найважливіших завдань у побудові сенсорних мереж, оскільки їх архітектурні та системні характеристики належать до категорії обмежень, серед яких слід відзначити наступні: обмежені енергетичні резерви, що призводить до обмеженого радіусу дії; обмежена продуктивність процесора; необхідність одночасного функціонування багатьох вузлів в обмеженому просторі; неможливість застосування архітектури "клієнт-сервер" через затримки; використання не ліцензованого спектру частот; низька вартість.

На сьогоднішній день розробка сенсорних мереж здійснюється з використанням стандарту IEEE 802.15.4 Zigbee, про який згадувалося раніше. Цей стандарт радіодоступу застосовується в різних сферах, таких як моніторинг, автоматизація виробництва, сенсори, безпека, контроль, побутова техніка та інші. Сенсорні мережі можуть бути використані, принаймні, в таких сценаріях. Перш за все, вони можуть бути використані для віддаленого моніторингу стану хворих, таких як пульс, тиск, ЕКГ, рівень цукру в крові та інші параметри. Для цього спеціалізований натільний або імплантований сенсор збирає статистику, яка передається до централізованої бази даних, доступ до якої має лікарняний персонал. Важливою умовою для функціонування такої системи є наявність бездротової сенсорної мережі, що охоплює всю територію лікарні. Такі сценарії мають велике соціальне значення, оскільки передбачається, що основними користувачами є літні люди та люди з обмеженими можливостями. Також варто відзначити поділ сенсорних мереж на комерційні та некомерційні. Ця класифікація важлива для визначення доступності статистики, зібраної мережею, для звичайних користувачів. Інформація може бути доступна безкоштовно, на комерційній основі або мати корпоративний характер.

Здатність бездротових сенсорних мереж адаптуватися до вирішення різноманітних завдань та використання останніх наукових і технологічних розробок робить їх актуальною і передовою мережевою технологією. Це може призвести до широкого розповсюдження бездротових сенсорних мереж на ринку. [6]

Переваги систем, заснованих на сенсорних мережах, включають можливість розміщення важкодоступних місцях, швидке та зручне розгортання та обслуговування, надійність у разі виходу з ладу окремих вузлів (інформація передається через сусідні елементи), можливість додавання або виключення пристроїв з мережі, високий проникність крізь перешкоди та стійкість до електромагнітних перешкод, а також тривалий час роботи без необхідності заміни елементів живлення.

Отже, бездротові сенсорні мережі, з усіма їх перевагами, знайшли широке застосування в сучасних телекомунікаційних системах.

1.3 Сенсорні мережі і суспільство

Сучасні безпроводні сенсорні мережі мають значний вплив на різні сфери життя людей і природних областей.

Застосування безпроводних сенсорних мереж веде до поліпшення якості життя та комфорту людей. Моніторинг довкілля дозволяє людям мати повну інформацію про оточуюче середовище, що допомагає забезпечувати надійні прогнози і оптимізувати взаємодію з природою.

Це сприяє безпеці та комфорту, а також зменшенню негативного впливу людської діяльності на навколишнє середовище. Важливо зазначити, що ефективний моніторинг виробничих процесів сприяє зниженню витрат і оптимізації управління. Сенсорні мережі також мають стратегічне значення в сфері національної безпеки, надаючи якісно нову інформацію, яка впливає на безпеку держави.[10]

Здобуття такої інформації противником може знизити рівень безпеки. У галузі економіки широке використання сенсорних мереж призводить до високої капіталізації сектору. Продаж сенсорів набрав великих обсягів, досягнувши мільйонних значень. Таким чином, сенсорні мережі мають великий потенціал поліпшувати якість життя людей у різних галузях та сприяти сталому розвитку.

Висновки:

У даному дослідженні було проведено порівняння сучасних безпроводних технологій залежно від вимог, що ставляться до них.

У таблиці були порівняні технології Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee та LoRa. За результатами порівняння виявлено, що технологія ZigBee, яка базується на стандарті IEEE 802.15.4 і відома також як "сенсорні мережі", має найбільшу кількість вузлів та найтривалішу автономну роботу.

Також були детально розглянуті безпроводні сенсорні мережі, їх особливості включають прийняття, обробку даних, моніторинг, комунікацію та джерела живлення. Сенсори є автономними пристроями, які можуть живитися від об'єктів моніторингу, пультів сигналізації або батарей, особливо в критичних ситуаціях.

Передача даних відбувається через пересилання інформації до найближчого вузла, а не до базової станції або точки доступу, як у традиційних мережах з фіксованою інфраструктурою. Такі мережі відомі як багатокрокові. При побудові надійних сенсорних мереж необхідно враховувати такі важливі аспекти, як стійкість, масштабованість, топологія та споживання енергії. Безпроводні сенсорні мережі мають можливість адаптуватися до різних завдань та використовувати останні наукові та технологічні досягнення, що робить їх передовою технологією і може сприяти формуванню широкого ринку.

Основні переваги систем, заснованих на сенсорних мережах, включають їх використання у сфері телекомунікацій, поліпшення якості життя людей, моніторинг довкілля для прогнозування та оптимізації взаємодії з природою з метою забезпечення безпеки та комфорту.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ З ДЕКІЛЬКОМА ПЕРЕДАВАЛЬНИМИ І ДЕКІЛЬКОМА ПРИЙОМНИМИ АНТЕНАМИ (MIMO)

У даному розділі розглядається система зв'язку, яка використовує кілька передавальних і прийомних антен, відома як MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output). Використання MIMO дозволяє поліпшити якість зв'язку та збільшити пропускну здатність шляхом одночасної передачі та прийому сигналів через різні антени.

У розділі також розглядаються різні моделі каналу зв'язку, які використовуються для аналізу систем MIMO.

Ці моделі враховують різні характеристики каналу, такі як коефіцієнти передачі сигналу, затримка та шум. Одна з найпоширеніших моделей є модель з незалежними гаусовими змінними, де кожна передавальна антена взаємодіє з кожною прийомною антеною незалежно. Також у розділі наводиться узагальнення відомої формули Шеннона для розрахунку пропускну здатності каналу зв'язку у системі MIMO.

Ця формула дозволяє оцінити максимальну швидкість передачі даних через систему MIMO залежно від кількості передавальних і прийомних антен, а також характеристик каналу зв'язку. Розділ 2 містить важливі концепції та моделі, необхідні для розуміння систем MIMO, і включає ключові формули, які дозволяють оцінити пропускну здатність цих систем..

2.1 Системи зв'язку з декількома антенами

Приймач у системах MIMO може мати різні конфігурації, в залежності від кількості приймально-передавальних антен, що використовуються. Одна з таких конфігурацій - SISO (Single-Input-Single-Output), де приймач взаємодіє

з однією антеною передавача. Інші конфігурації включають SIMO (Single-Input-Multiple-Output), де приймач використовує декілька антен передавача, та MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), де як приймач, так і передавач використовують багатoelementні антени [3].

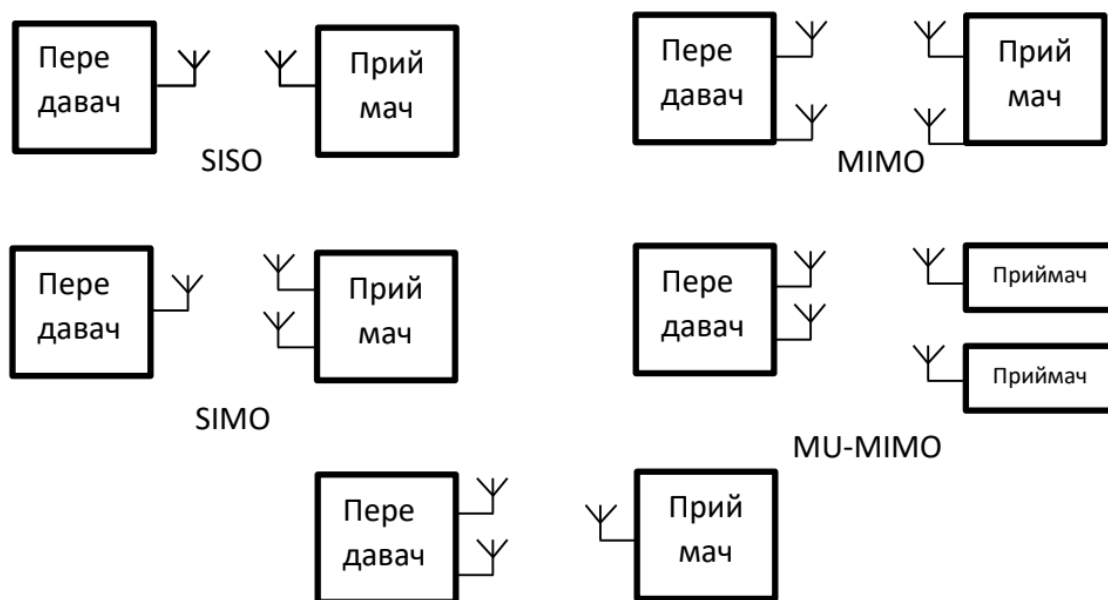


Рис.2.1 Можливі антенні конфігурації

Рисунок 2.1 ілюструє можливі антенні конфігурації. У системах MIMO використовуються багатoelementні антени або антенні решітки як на передавальній, так і на приймальній стороні. Багатoelementні антени можуть бути налаштовані для зосередження енергії в напрямку конкретного абонента шляхом формування діаграми спрямованості (beamforming). Крім того, вони можуть використовуватись для передачі паралельних потоків даних за допомогою просторового мультиплексування (spatial multiplexing).

Застосування просторового рознесення, просторового мультиплексування та формування діаграми спрямованості дозволяє досягти кількох позитивних ефектів у системах MIMO [6]:

- Збільшення стійкості системи та зниження ймовірності помилки.
- Підвищення швидкості передачі інформації.

- Збільшення зони покриття.
- Зменшення потужності передавача, що необхідна для досягнення заданих параметрів зв'язку.

Проте, ці чотири позитивні властивості систем МІМО не можуть бути одночасно реалізовані. Наприклад, збільшення швидкості передачі даних може призвести до збільшення ймовірності помилки або вимагати більшої потужності від передавача. Тому при розробці конкретної системи зв'язку необхідно знаходити компроміс, який враховує потрібний баланс між цими позитивними ефектами.[8]

2.2 Математична модель системи МІМО

Розглянемо систему з кількома вхідними і вихідними антенами, що використовує технологію МІМО (багатовхід-багатовихідна система) з N передавальними антенами і M прийомними антенами [3]. На рисунку 2.2 зображена спрощена структурна схема цієї системи.

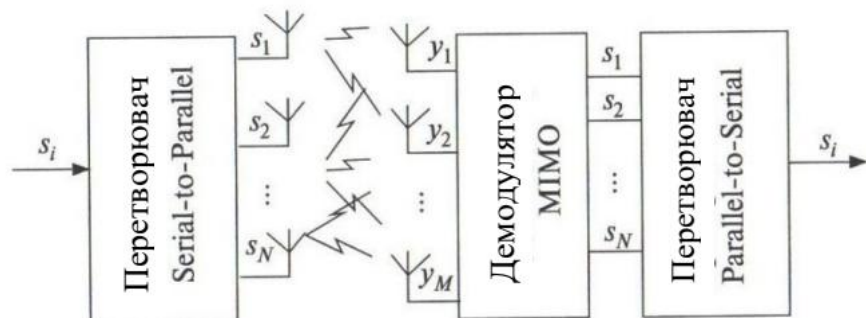


Рис. 2.2 Структурна схема системи МІМО

Предбачається, що передається вектор комплексних інформаційних символів s , який має розмірність $N \times 1$, і при цьому символ s_i передається через i -ту антену. Матриця каналу H є прямокутною комплексною матрицею розмірності $M \times N$. Компонента h_{ij} цієї матриці є комплексним коефіцієнтом

передачі каналу між j -тою передавальною антеною і i -тою приймальною антеною. Будемо вважати, що потужність сигналу в кожній приймальній антені дорівнює потужності E_s всього випромінюваного сигналу (тобто, рівна сумарній потужності сигналів, випромінюваних всіма передавальними антенами). Це означає, що тут ми не враховуємо ослаблення сигналу в каналі зв'язку.

З огляду на це елементи матриці каналу \mathbf{H} повинні задовольняти наступне нормувальне співвідношення:

$$\sum_{j=1}^N E \{ |h_{ij}|^2 \} = N, i = 1, 2, \dots, M \quad (2.1)$$

де $E \{ \dots \}$ - операція обчислювання математичного очікування

Слід зауважити, що елементи матриці каналу \mathbf{H} можуть бути як випадковими комплексними величинами, так і не випадковими (детермінованими) комплексними числами. В останньому випадку в рівнянні (2.1) операція $E \{ \dots \}$ повинна бути опущена.

Модель сигналу на вході приймача може бути представлена в наступній формі:

$$y = \mathbf{H}s + \eta, \quad (2.2)$$

де η - комплексний випадковий гаусівський вектор шумів спостереження розмірності $M \times 1$ з нульовим середнім і кореляційної матрицею $\sigma^2 * \mathbf{I}_M$, де \mathbf{I}_M - одинична матриця розмірності $M \times M$;

y - вектор розмірності $M \times 1$, який ми спостерігаємо.

Кожна компонента шуму спостереження має дисперсію $2\delta_\eta^2$, тобто дисперсії шумів спостереження у всіх приймальних антенах передбачаються однаковими. Оскільки потужність сигналу в кожній приймальній антені дорівнює, за нашим припущенням, загальної випромінюваної потужності, можна записати наступний вираз для відношення сигнал-шум:

$$\gamma = \frac{E_s}{2\delta_\eta^2} \quad (2.3)$$

Для подальшого опису нам буде потрібний вираз для кореляційної матриці сигналу, отриманий за допомогою (2.4):

$$R_{YY} = E\{yy'\} = HR_{SS}H + 2\delta_\eta^2 * 1 \quad (2.4)$$

де $R_{SS} = E\{ss'\}$ - кореляційна матриця переданого сигналу, вираз для якої може бути записано наступним чином:

$$R_{SS} = \frac{E_S}{N} * 1 \quad (2.5)$$

передбачається, що сигнали, що випромінюються усіма передавальними антенами, мають однакові потужності, рівні E_s/N .

Висновки:

У цьому розділі розглядається модель системи зв'язку з багатьма передавальними і прийомними антенами, відома як MIMO (Multiple Input Multiple Output) - багатоканальне передавання-прийом.

Ця модель є розширенням систем SIMO (Single Input Multiple Output) і MISO (Multiple Input Single Output), де використовується кілька передавальних і прийомних антен. Також розглядаються різні моделі каналу зв'язку, які використовуються для аналізу систем MIMO. Представлені схематичні зображення можливих конфігурацій багатоантенних систем.

Освітлені чотири позитивні властивості систем MIMO:

- Збільшення стійкості системи шляхом зменшення ймовірності помилки. Підвищення швидкості передачі інформації в системі.
- Розширення зони покриття.
- Зменшення необхідної потужності передавача.
- Додатково, наведено узагальнення відомої формули

Шеннона для розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку в контексті системи MIMO.

РОЗДІЛ 3

БАГАТОКАНАЛЬНЕ КООПЕРАТИВНЕ МІМО ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ З MAC ПРОТОКОЛОМ

3.1 Введення MAC протоколу

Бездротові сенсорні мережі (WSNs) знайшли широке застосування в різних областях, таких як медичне обслуговування, інтелектуальні будинки та промислові застосування. Вузли датчиків зазвичай мають обмежену потужність та використовують батареї як джерело енергії, а комунікація є головним споживачем енергії в мережах WSNs. Тому підвищення енергоефективності комунікацій є важливою задачею досліджень в галузі WSNs.

Одним з підходів до досягнення цієї мети є покращення ефективності управління доступом до середовища (MAC) шляхом зменшення накладних витрат і уникнення непотрібного споживання енергії, спричиненого нагріванням та зіткненнями. Крім того, розробка MAC-протоколів, що використовують інформацію про поперечний розріз, може додатково підвищити ефективність. Інший ефективний підхід полягає в підвищенні енергоефективності на фізичному рівні шляхом використання кооперативної технології МІМО.

3.1.1. Робота MAC-протоколів

У середовищі керування доступом в бездротових сенсорних мережах (WSNs) велика кількість сенсорних вузлів отримує доступ до мережі та передає дані. З обмеженим джерелом живлення сенсорних вузлів традиційні протоколи MAC не є ефективними через споживання енергії під час прослуховування, зіткнень та керування. Для зниження споживання енергії, пов'язаного з прослуховуванням, вузли сплять більшу частину часу та

прокидаються тільки для передачі/прийому повідомлень.

Однак, при збільшенні навантаження на трафік, енергія, витрачена на зіткнення, стає значною. Для полегшення інтенсивних зіткнень використовують квазі-статичні протоколи, де кожен вузол отримує найменший використаний канал, а порядок призначення визначається його залишковою енергією. Також існують динамічні багатоканальні протоколи MAC, де вузли узгоджують канал зв'язку перед кожною передачею. Проте у практиці може відсутніти достатня кількість ортогональних каналів у WSNs. [12]

В такому випадку витрати, пов'язані з конфліктами каналів, можуть використовувати надмірну пропускну здатність при великому трафіку. Тому цей тип протоколів MAC не забезпечує задовільну продуктивність з точки зору пропускну здатності та ефективного використання енергії при інтенсивному навантаженні. Використання планування часового розділення може повністю уникнути зниження продуктивності при великому трафіку. Протокол MAC з часовим розділенням (TDMA) для WSNs вирішує проблему розподілу часових інтервалів за допомогою евристичного алгоритму, що базується на окрасці ребер графа.

Крім того, запропонований багатоканальний протокол MAC з часовим розширенням для тимчасових мереж повністю використовує планування часового розділення та кілька каналів, де як часові інтервали, так і канали зв'язку узгоджуються перед кожною передачею.

3.1.2. Роботи сумісного проектування MAC рівня

Протоколи керування доступом можуть бути спільно розроблені з урахуванням іншої наявної інформації в мережі. Зокрема, моделі трафіку багатьох конкретних програм в бездротових сенсорних мережах передбачувані. Така передбачуваність може бути використана в

багатоканальних структурах протоколу керування доступом для подальшого підвищення ефективності використання енергії.

Вимоги трафіку багатоканального протоколу керування доступом використовуються в кожному вузлі як метрика для призначення каналу. Вузли з високими вимогами трафіку отримують канал, призначений раніше, так що загальний конфлікт може бути значно знижений. Багатоканальний протокол керування доступом на основі дерева для додатків збору даних в бездротових сенсорних мережах організовує вузли у вершини під-дерева .

Канали призначаються різним під-деревам, щоб уникнути міждеревних завад. Потім отримані дані передаються в приймач даних вздовж під-дерева. Для формування під-дерев і мінімізації конфліктів між деревами був наданий евристичний алгоритм. Кластеризація є ще одним ефективним підходом до підвищення ефективності використання енергії в бездротових сенсорних мережах шляхом скорочення надлишкових передач. Призначення різних каналів на сусідні кластери може додатково підвищити продуктивність шляхом усунення завад.

Схема розподілу призначення каналів для кластерних бездротових сенсорних мереж, в якій головки кластерів призначають канали для кожного елемента кластера, а порядок призначення залежить від ваги головки кластера. Динамічний багатоканальний протокол керування доступом для кластерних бездротових сенсорних мереж, де кожний сенсорний вузол узгоджує канал зв'язку з його головою кластера по каналу управління за замовчуванням перед передачами даних.[13]

3.1.3. Споріднені роботи на фізичному рівні

Останнім часом технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) з декількома передавальними і прийомними антенами отримала широке

застосування у бездротових мережах зв'язку. Вона забезпечує підвищення пропускної здатності мережі та покращення ефективності передачі на фізичному рівні.

Однак, у бездротових сенсорних мережах (WSNs) з обмеженими розмірами сенсорних вузлів встановлення декількох антен може бути складним. Тому в WSNs використовується кооперативний MIMO шляхом організації масиву MIMO з декількома вузлами. Використання кооперативного MIMO у WSNs дозволяє заощаджувати енергію, особливо при передачі на великі відстані.

Кооперативний MIMO покращує продуктивність системи порівняно з однодруковано-приймальними антенами (SISO), навіть для передачі на невеликій відстані з оптимальними параметрами модуляції. Уже існують протоколи MIMO на основі кластерів для WSNs, де обрані найкращі кооперативні вузли для міжкластерної комунікації. Головні кластерні головки передають міжкластерні повідомлення кооперативним вузлам, які, в свою чергу, передають повідомлення до головки кластера за допомогою кооперативного MISO. Один з таких протоколів, відомий як CMIMO, використовує кластерну/маршрутну інфраструктуру з кооперативним MIMO для WSNs.

Кожен кластер обирає головну головку та підлеглу кластерну головку, де головна головка працює як звичайна головка кластера, а підлегла використовується для кооперативного MIMO зв'язку. Протокол використовує TDMA для внутрішньо-кластерних комунікацій та міжкластерних переговорів між головками сусідніх кластерів з метою вибору оптимального режиму передачі енергії для міжкластерної комунікації. Багато існуючих протоколів MAC з кооперативним MIMO використовують один канал для обміну даними і не мають схеми планування з декількома каналами. Використання комбінації декількох каналів може значно підвищити

продуктивність внутрішньо-кластерного та міжкластерного зв'язку.

Тому пропонується багатоканальний протокол MAC з кооперативним MIMO (MCCMIMO) для WSNs, який спрямований на зниження споживання енергії при зіткненнях та покращення пропускної здатності системи. MCCMIMO включає новий алгоритм кластеризації для мінімізації міжкластерної відстані, алгоритми розподілу каналів для кластерів та кооперативних міжкластерних MIMO-зв'язків для подовження терміну служби мережі, а також синхронізований протокол MAC для внутрішньо-кластерного та міжкластерного зв'язку. Результати моделювання показують, що запропонований протокол MCCMIMO перевершує інші схеми за енергоефективністю, пропускною здатністю та затримкою.

3.2 Формування кластеру і вибір кооперативного MIMO зв'язку

Загальна структура MCCMIMO показана на рис.3.1. У MCCMIMO, сенсорні вузли організовані в групи, в них кооперативні зв'язки MIMO використовуються для міжгрупової комунікації. Потім канали призначаються групам і кооперативним посиленням MIMO, щоб зменшити перешкоди і дозволити одночасну комунікацію для внутрішньогрупового та міжгрупового зв'язку. Передачі даних у внутрішньогруповому та міжгруповому зв'язку здійснюються в MAC-інтервалах, що відбуваються послідовно в кожному вікні MAC.

Формування кластеру	Вибір кооперативного вузла	Присвоювання каналу	MAC Інтервал 1	MAC Інтервал 2
------------------------	----------------------------------	------------------------	----------------------	----------------------	--------

Рис.3.1 Структура MCCMIMO

Алгоритми формування груп та розподілу каналів виконуються періодично, з урахуванням рівня залишкової енергії в сенсорних вузлах. Під

час процесу формування груп і вибору кооперативного МІМО зв'язку, всі комунікації відбуваються через канал за замовчуванням. Кожен вузол використовує метод доступу з можливістю уникнення конфліктів (CSMA/CA) для отримання доступу до каналу.

Припускається, що в цей час немає зіткнень, і приймач може оцінити відстань від передавача за допомогою індикатора сили сигналу (RSSI) отриманих пакетів. Крім того, сенсорні вузли можуть передавати пакети з двома рівнями потужності: P_{low} і P_{high} . Процес формування групи та вибору кооперативного МІМО зв'язку включає такі етапи:

- Етап виявлення сусідів, де кожен вузол передає свою залишкову енергію сусідові на відстані 1-крок.
- Етап визначення ваги, де кожен вузол обчислює та передає свою вагу сусідові на відстані 1-крок.
- Етап формування групи, де групи створюються на основі отриманої інформації про ваги на попередньому етапі.
- Етап виявлення сусідніх груп, де кожен член групи повідомляє керівнику групи про свої сусідні групи на відстані 1-крок, щоб керівник групи знав всі сусідні групи та прилеглі вузли.
- Етап вибору кооперативного МІМО зв'язку, де кожна пара сусідніх груп вибирає оптимальний кооперативний МІМО зв'язок для міжгрупової комунікації.[17]

3.2.1. Фаза виявлення сусідів

На цьому етапі кожен вузол передає повідомлення про залишкову енергію (Residual Energy (RE)), яке включає в себе енергію, що залишилася, і передає його до найближчого сусіда при потужності P_{low} . Формат повідомлення показаний на Рис.3.2 (а).

Тип MAC	Підтип	Вузол ID	Дані
1	1	ID	Решта енергії

(a)

Тип MAC	Підтип	Вузол ID	Дані
1	2	ID	Вага

(b)

Рис. 3.2. Формати повідомлень про залишкову енергію (RE) і про вагу вузла (NW). (a) RE повідомлення. (b) NW повідомлення.

Кожен вузол датчика продовжує прослуховувати основний канал, щоб отримувати повідомлення від усіх своїх сусідів. Після отримання повідомлення RE від сусіда, вузол додає запис до списку сусідів, включаючи залишкову енергію сусіда і визначену відстань між ними. Коли канал знаходиться в режимі очікування на CW_{max} , вузол робить висновок, що він отримав RE повідомлення від усіх сусідів і переходить до фази виявлення ваги сусідів, що знаходяться від нього на 1-крок.

3.2.2. Фаза виявлення ваги

На етапі виявлення ваги, обчислюється вага кожного вузла і передається для підготовки до наступної фази - формування кластерів. Як зв'язкові вузли, головки кластерів споживають енергію швидше, ніж інші члени кластеру. Тому враховування залишкової енергії головки кластеру впливає на вагу вибору. Крім того, оскільки основні передачі в більшості кластерних WSNs є внутрішньо-кластерними, а споживання енергії залежить від відстані передачі, середня відстань до найближчого сусіда також враховується у вазі.

Таким чином, вага кожного вузла визначається рівнянням (3.1), де $N(i)$ - набір сусідніх вузлів для вузла i , $D(i, j)$ - відстань між вузлом i та вузлом j , а

$E(i)$ - енергія вузла i . [14]

$$Weight(i) = (\sum_{j \in N(i)} d(i,j)) / E(i) |N(i)| \quad (3.1)$$

Після обчислення ваги, кожен вузол передає повідомлення про вагу вузла (NW) при потужності P_{low} . Аналогічно до фази виявлення сусідів на відстані 1-крок, кожен вузол продовжує прослуховувати та оновлювати свій список сусідів з інформацією про їх вагу. Після отримання всіх повідомлень NW від сусідів зі списку сусідів на відстані 1-крок, вузол переходить до фази формування кластеру.

3.2.3. Фаза формування кластера

На даному етапі, сенсорні вузли з найменшою масою серед сусідів на відстані 1-крок визначаються як голови кластера. Процедура вибору голови кластера виконується в кожному вузлі, оскільки кожен вузол має інформацію про маси своїх найближчих сусідів.

Вузол передає повідомлення про оголошення голови кластера (СНА), щоб оголосити себе як голову кластера. Також, вузол надсилає повідомлення про приєднання до кластера (СJ) для вступу до кластера. Формати повідомлень СНА і СJ показані на рис. 3.3(а) і 3.3(б). На початку цієї фази, вузол з найменшою масою передає повідомлення СНА. Інші вузли продовжують прослуховувати канал, поки всі сусіди на відстані 1-крок з меншою масою не оновлять свої статуси. Для кожного сенсорного вузла тільки один сусід з найменшою масою стає головою кластера, після чого вузол розсилає повідомлення СJ.

Якщо декілька сусідів з найменшою масою оголошують себе головами кластера, вузол вибирає найближчого сусіда і приєднується до нього. В іншому випадку, якщо всі сусіди мають однакову масу та оголошують себе членами кластера, надсилаючи повідомлення СJ, вузол обирає себе як голову кластера. Процедура вибору голови кластера завершується, коли всі вузли

оновили свої статуси. Рис.3.4 ілюструє результати формування кластерів для випадково згенерованих WSN з 150 вузлами у полі розміром 250 м × 250 м.

MAC Type	Subtype	Node ID	Data
2	1	ID	Cluster ID

(a)

MAC Type	Subtype	Node ID	Data
2	2	ID	Cluster ID

(b)

Рис. 3.3 Формати повідомлення оголошення головою кластера (CHA) і повідомлення приєднання до кластеру (CJ). (a) повідомлення CHA. (b) CJ повідомлення.

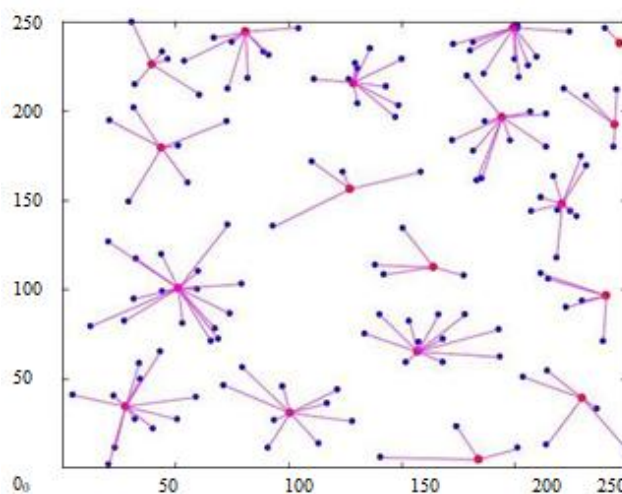


Рис. 3.4 WSN згруповані по MCCMIMO, в яких кластерні головки позначені червоними крапками, члени кластера позначені синіми крапками, а за допомогою ліній позначені зв'язки між головками і членами кластера.

3.2.4. Фаза виявлення сусідніх кластерів

Після етапу формування кластера, кожен учасник кластера оновлює інформацію про голову свого кластера в списку найближчих сусідів на

відстані 1-крок, прослуховуючи повідомлення СНА / СІ від сусідів. У цей час учасники кластера надсилають повідомлення кластерної переадресації (Cluster Forward (CF)) до голови свого кластера, включаючи оновлений список сусідів. Формат повідомлення CF показаний на рис. 3.5.

Після отримання всіх повідомлень CF від учасників кластера, голова кластера отримує інформацію про всі сусідні кластери та їх граничні вузли. Наступним кроком є вибір лінії кооперативного зв'язку МІМО.

Тип MAC	Підтип	ID вузла	Дані
3	1	ID	1-й Сусід ID, кластер, відстань 2-й Сусід ID, кластер, відстань ⋮

Рис. 3.5 Формат повідомлення переадресації (CF)

3.2.5. Фаза вибору кооперативного МІМО зв'язку

На даному етапі кожна голова кластера співпрацює з прилеглими головами кластерів, щоб оптимально вибрати кооперативні МІМО зв'язки, оскільки можуть існувати кілька зв'язків між сусідніми кластерами. Наприклад, на малюнку 6 ((3,4), (6,7)) і ((5), (8,9)) можуть використовуватися як спільні МІМО зв'язки між кластерами А і В. Загалом, враховуючи енергоефективність та залишкову енергію, необхідно вибрати МІМО зв'язок з найбільшою вагою для економії енергії передачі та уникнення виснаження лінії зв'язку.

Для визначення ваги кооперативного МІМО зв'язку використовується емпіричний коефіцієнт впливу δ , який можна налаштувати залежно від потреб програми. Зв'язок з найбільшою вагою обирається як кооперативний МІМО для міжкластерного зв'язку. Вибір кооперативного МІМО зв'язку між двома кластерами може бути здійснений на будь-якому кінці лінії зв'язку,

оскільки після формування кластеру кожна голова кластера має інформацію про всі сусідні кластери і прилеглі вузли.

Уникнення неузгодженості забезпечується тим, що кластер з меншим ідентифікатором (ID) вибирає кооперативний зв'язок між двома сусідніми кластерами. Після вибору кооперативного MIMO зв'язку голова кластера з меншим ID надсилає запит на кооперативний MIMO-зв'язок (SMIMOLR), який підтверджується кооперативним повідомленням MIMO-зв'язку ACK (SMIMOLA) від іншої сусідньої голови кластера.

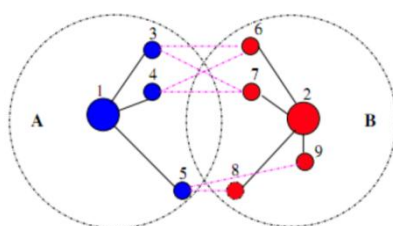


Рис. 3.6 Приклад потенційних кооперативних MIMO зв'язків між двома сусідніми кластерами. $((3,4),(6,7))$ і $((5),(8,9))$ можуть бути кооперативними MIMO зв'язками між кластерами A і B.

Після завершення цього етапу формування кластерів та вибору кооперативних MIMO зв'язків для кожної пари сусідніх кластерів, можуть виникати конфлікти через механізм CSMA / CA. Однак процедура формування кластеру виконується періодично, тому оптимальні голови кластерів та кооперативні зв'язки MIMO можуть бути переоцінені під час наступної процедури. Таким чином, вплив конфліктів на енергоефективність та термін служби мережі є незначним у довгостроковій перспективі.

Тип MAC	Підтип	ID вузла	Дані
4	1	Власний ID кластера	Сусідній ID кластера Вага кластера Вага кооперативний MIMO зв'язку

(b)

Рис. 3.7 Формати переговорів кооперативних повідомлень MIMO зв'язку. (a)

Запит кооперативного повідомлення MIMO зв'язку (CMIMOLR). (b)

Кооперативне повідомлення MIMO зв'язку ACK (CMIMOLA).

Тип MAC	Підтип	ID вузла	Дані
4	1	Власний ID кластера	Сусідній ID кластера Власні кооперативні MIMO вузли Сусідні кооперативні MIMO вузли

(a)

Тип MAC	Підтип	ID вузла	Дані
4	1	Власний ID кластера	Сусідній ID кластера Вага кластера Вага кооперативний MIMO зв'язку

(b)

Рис.3.7 Формати переговорів кооперативних повідомлень MIMO зв'язку. (a) Запит кооперативного повідомлення MIMO зв'язку (CMIMOLR).

(b) Кооперативне повідомлення MIMO зв'язку ACK (CMIMOLA).

3.3 Призначення каналів в MССMIMO

У MССMIMO, синхронізація відбувається як у внутрішньо-кластерному, так і у міжкластерному зв'язку. Це означає, що сусідні кластери можуть взаємовпливати під час внутрішньо-кластерного зв'язку, а близькі кооперативні зв'язки MIMO можуть взаємовпливати під час міжкластерного з'єднання.

Щоб уникнути проблем зі зниженням пропускної здатності та енергоефективності, спричинених перешкодами, різними кластерами та кооперативним зв'язком МІМО необхідно призначати різні канали. Однак розподіл каналів для кластерів та кооперативних зв'язків МІМО є складною задачею.

Для забезпечення практичних рішень пропонуються два розподілені алгоритми економічного просування для призначення каналів кластеру та кооперативних зв'язків МІМО.

На етапі призначення каналу всі вузли мають доступ до каналу за допомогою механізму CSMA/CA, і використовується сталий час відгуку, щоб уникнути зіткнень. Застосовується один і той же набір доступних каналів для внутрішньо-кластерної та міжкластерної комунікації, щоб уникнути одночасності передачі. Під час реформування кластера спочатку виконується процедура призначення каналу для кластера, а потім процедура узгодження каналу для з'єднання МІМО.[18]

3.3.1. Призначення каналів для кластерів.

Розширення терміну служби бездротових сенсорних мереж (WSN) можливе шляхом економії енергії у кластерах з низьким залишковим рівнем енергії. У системі МССМІМО, канали призначаються кластерам з найменшою залишковою енергією, щоб забезпечити менш активне використання каналів. Ми визначаємо залишкову енергію кластера та всіх його членів, надаючи різні ваги кластерним голівкам та членам кластеру, оскільки головка кластера споживає енергію швидше. Нехай h - група кластера I , а $C(I)$ - множина членів кластера I .

Залишкова енергія кластера I обчислюється за формулою:

$$E_n(I) = 0.5E_n(h) + 0.5(\text{сума за всіма } i \text{ в } C(I) E_n(i)/|C(I)|) \quad (3.2)$$

У системі МССМІМО кластерна головка повинна знати залишкову

енергію всіх сусідніх кластерів, щоб визначити послідовність розподілу каналів.

Інформацію про залишкову енергію сусідніх кластерів можна додати до повідомлення СМІМО АСК під час вибору каналу СМІМО. Якщо кластер має найменшу залишкову енергію в однокроковому сусідстві, головка кластера призначає собі найменш використовуваний канал та надсилає інформацію про призначений канал (CA) сусіднім кластерам з високою потужністю P_{high} . В іншому випадку вона продовжує слухати та оновлювати свою таблицю використання каналів, поки всі сусідні кластери з меншою енергією не призначать свої канали. На рисунку 3.4 показано призначення каналів для кластерів. Кольори вузлів датчиків відображають використовувані канали для внутрішньокластерного зв'язку.

3.3.2. Призначення каналів для кооперативних МІМО зв'язків.

Аналогічно призначенню каналів для кластерів, важливо спочатку призначати кооперативні МІМО зв'язки з меншою енергією, щоб знизити витрати енергії, пов'язані зіткненнями та збільшити термін служби мережі. Однак енергоефективність кооперативних МІМО зв'язків сильно залежить від рівня перешкод. Враховуючи ці фактори, вплив кооперативних МІМО зв'язків на призначення каналів визначається рівнянням (3.3). Вага кооперативних зв'язків МІМО враховується як співвідношення між енергією та ефективністю.

$$(\text{Weight}_{CA}(l) = E_n(l)/E_f(l) \quad (3.3)$$

Для реалізації кооперативних МІМО зв'язків використовується трьохсторонній механізм узгодження зв'язку. Цей механізм має дві переваги. По-перше, він дозволяє виявляти та призначати найменш використовуваний канал на обох кінцях зв'язку. По-друге, сусідні кластери на обох кінцях можуть оновлювати свої таблиці використання каналів.

Для кожного зв'язку встановлюється таймер, який залежить від його ваги. По закінченню таймера, нижній ідентифікатор кінця зв'язку ініціює процедуру призначення каналу шляхом надсилання запиту призначення каналу (Request CA) разом із найкращим списком каналів. Після отримання запиту CA, інший кінець зв'язку обирає канал з найменшими перешкодами на підставі інформації з повідомлення запиту CA та власної таблиці використання каналів, і надсилає повідомлення підтвердження виділення каналу (CA ACK). Потім головка кластера нижнього кінця передає повідомлення відповіді каналу (CA Response), щоб підтвердити отримання повідомлення CA ACK. Кожна головка кластера продовжує прослуховувати та оновлювати таблицю використання каналів до тих пір, поки всі її сусідні кооперативні MIMO зв'язки не отримають призначений канал.

Важливо, щоб вагові значення зв'язків були унікальними, щоб уникнути конфліктів. Якщо вагові значення не є унікальними, можуть виникнути зіткнення, які можуть призвести до призначення каналу для декількох заважаючих кооперативних MIMO зв'язків. Тим не менше, моя схема запобігання зіткнень для міжкластерних комунікацій у MAC добре працює і не суттєво впливає на продуктивність, як буде показано в наступних розділах. Приклад призначення каналу для спільних MIMO зв'язків в WSN показано на рис.3.8

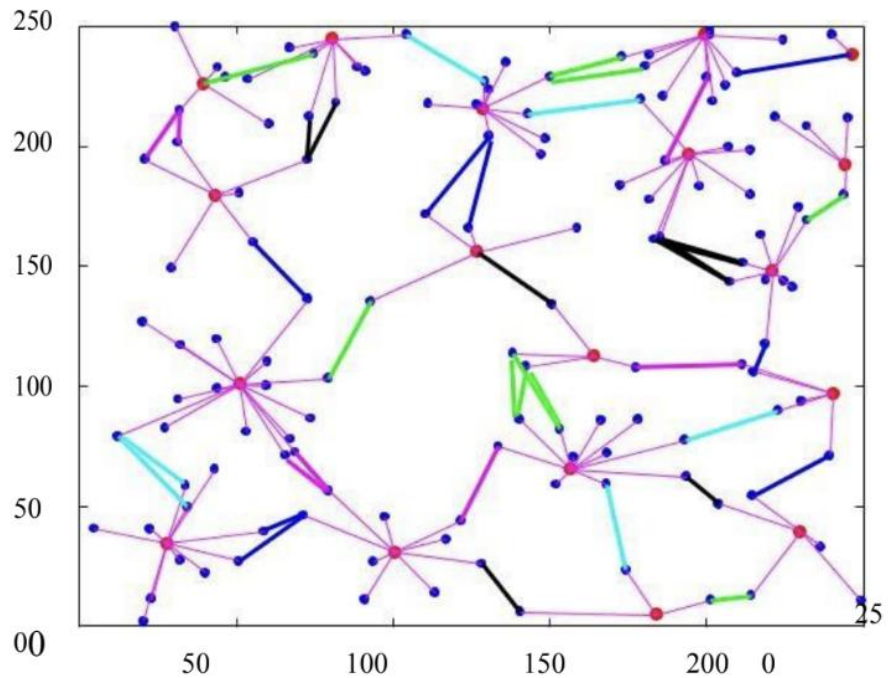


Рис.3.8.Призначення каналу для кооперативних МІМО зв'язків WSN. Червоні точки означають кластерні голови, сині точки позначають члени кластера; зв'язок між головками і членами кластеру представлені тонкими фіолетовими лініями, кооперативні зв'язки МІМО позначені суцільними лініями. Кольори суцільних ліній являють собою різні канали, призначені для кооперативних зв'язків МІМО

3.4 Проміжний контроль доступу

У цьому підрозділі представлено введення механізму проміжного контролю доступу для МССМІМО. Час поділяється на фіксовані MAC-інтервали, кожен з яких складається з чотирьох вікон:

- Фаза синхронізації: кожен вузол синхронізує свій годинник.
- Фаза від кластерних учасників до кластерних лідерів: учасники кластеру передають повідомлення своїм кластерним лідерам.
- Фаза від кластерних лідерів до кластерних учасників: лідери кластеру передають повідомлення учасникам кластеру і кооперативним вузлам

МІМО.

- Фаза зв'язку між кластерами: міжкластерні повідомлення передаються через кооперативні зв'язки МІМО.

Фаза синхронізації	Фаза від кластерних членів до кластерних головок	Фаза від кластерних головок до кластерних членів	Фаза зв'язку між кластерами
--------------------	--	--	-----------------------------

Рис.3.9 Компоненти інтервалу МССМІМОМАС.

3.4.1. Фаза від кластерних членів до кластерних головок

На початку цієї фази, вузли кооперативного МІМО зв'язку налаштовують свій канал на кластерний для внутрішньо-кластерного зв'язку з метою уникнення зіткнень і зменшення споживання енергії при прослуховуванні. Використовується TDMA для планування передачі даних. Довжина вікна фази зафіксована в мережі, враховуючи максимальний розмір кластерного тимчасового інтервалу.

Кількість сенсорних вузлів і площа розгортання дозволяють наблизитися до розрахункового значення. У кожному часовому інтервалі на початку фази є коротке вікно індикації трафіку, яке визначається хешуванням ідентифікатора вузла кластера. Якщо воно містить очікуваний трафік, вузол передає повідомлення до кластерної головки. Після цього вузол переходить у сплячий режим до початку фази "Від кластерних головок до кластерних учасників", якщо він не має пакетів для передачі. [25]

Якщо ж у вузла є пакети, він прокидається лише під час свого відповідного часового інтервалу для надсилання пакету до кластерної головки.

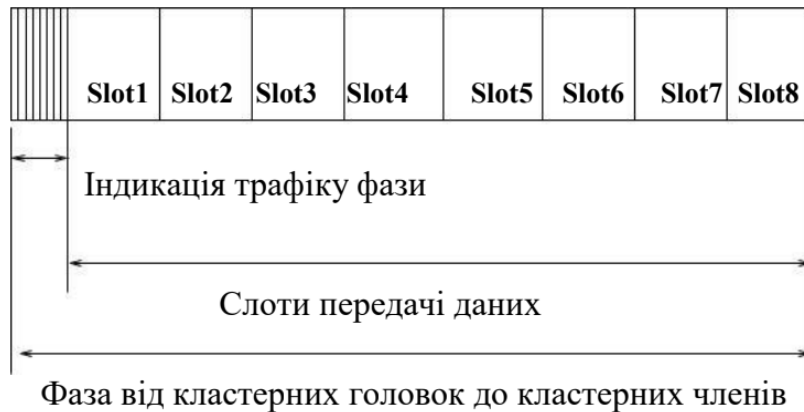


Рис.3.10 Фаза від кластерних членів до кластерних головок інтервалів МССМІМО МАС.

3.4.2. Фаза від кластерних головок до кластерних членів

У цій фазі, кластерні керівники передають повідомлення своїм учасникам кластера, включаючи як внутрішньо-кластерні пакети, так і пакети, які мають бути передані іншим кластерам через спільні МІМО зв'язки. Не обов'язково, щоб всі учасники кластера були активними, оскільки кожен з них має лише кілька пакетів.

З метою уникнення надмірного споживання енергії, керівник кластера передає повідомлення індикації трафіку, яке вказує на розподіл часових інтервалів для кожного кластера на початку цієї фази. Визначення для кожного елемента кластера на початку цього вікна. Кількість тимчасових інтервалів для кожного елемента кластера визначається вимогами трафіку. Після отримання повідомлення індикації трафіку, учасник кластера переходить у сплячий режим, за винятком тимчасових інтервалів, в які заплановано отримання пакетів від керівника кластера. Керівник кластера надсилає пакети в порядку, зазначеному в повідомленні індикації трафіку. Структура цього вікна показана на рис. 3.11.

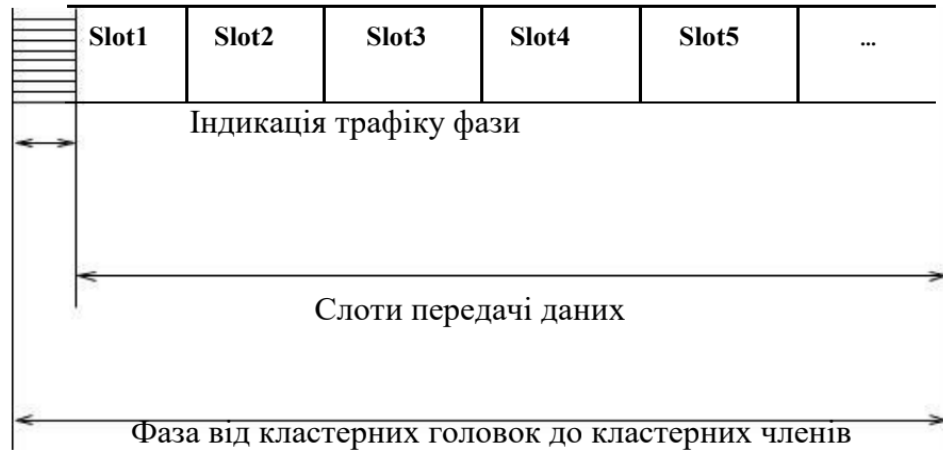


Рис. 3.11 Фаза від кластерних головок до кластерних членів інтервалів MCS-MIMO-MAC

3.4.3. Фаза міжкластерних зв'язків

На початку даної фази, вузли кооперативних MIMO зв'язків перемикають свій канал на канали, призначені для міжкластерного зв'язку. Однак, навіть після призначення каналу, можуть виникати перешкоди та зіткнення серед кооперативних зв'язків MIMO. Тому перед передачею пакета, кожен кінець SMIMO лінії повинен сприймати канал.

Застосування експоненціальної схеми відведення механізму CSMA/CA не підходить, оскільки непередбачуваний час початку передачі ускладнює фіксацію довжини фази міжкластерного зв'язку. Тому ми розробляємо напівдетермінований механізм CSMA/CA для вирішення цієї проблеми. Як показано на рис. 3.12, фазу міжкластерного зв'язку додатково розділено на проміжні підвікна. Кожне підвікно складається з CWfix конкуруючих слотів і періоду, достатньо довгого для передачі пакету максимальної довжини.

На початку кожного підвікна, кожен вузол встановлює таймер з випадковим значенням в діапазоні від нуля до тимчасових інтервалів CWfix і слухає призначений йому канал. Після закінчення таймера, вузол починає передачу пакету, починаючи з кооперативної преамбули синхронізації

МІМО. Якщо вузол виявляє передачу до закінчення терміну дії власного таймера, він перевіряє, чи пакет був відправлений за допомогою кооперативного передавача МІМО. Якщо так, він одночасно передає пакет після закінчення преамбули синхронізації.

У протилежному випадку він скасовує свою передачу, переходить в сплячий режим або приймає пакет, якщо він адресований йому. Після успішної передачі, вузол переходить в сплячий режим до початку наступного підвікна, якщо довжина пакета коротша за максимальну. Вузол, який не має пакетів для передачі або приймача, переходить в сплячий режим після виявлення передачі. На початку наступного підвікна, кожен вузол встановлює нове випадкове значення для таймера та починає новий раунд конкуренції. Значення CW_{fix} та кількість підвікон періодично коригуються під час фази перетворення кластера на основі трафіку.



Рис.3.12 Фази міжкластерних зв'язків інтервалів МССМІМО АС.

3.5 Аналіз Енергетичної Ефективності

У цьому розділі буде досліджуватися енергоефективність протоколу МССМІМО. Припустимо, що при внутрішньокластерній і міжкластерній взаємодії виникають занепади каналів Релея.

3.5.1. Формування кластерів і виділення затрат каналу

Згідно з припущеннями, кожен вузол повинен відправити три пакети для формування кластера і більшість δ пакетів для кооперативного вибору лінії зв'язку MIMO, де δ - це максимальна кількість кластерів (сусідніх кластерів). Для призначення каналу кластера кожен вузол виконує одну передачу з високою потужністю P_{high} , а для призначення каналу кооперативних зв'язків MIMO - багато $(3/2)\delta$ передачі з високою потужністю P_{high} .

Обидва алгоритми, що використовуються для формування каналу кластера в MССMIMO, є квазістатичними. Припускається, що топологія мережі залишається незмінною, що уникає неефективного споживання енергії. Немає потреби виконувати ці процедури для кожного MAC-інтервалу. Тому споживання енергії цих двох фаз можна пренебрегти в порівнянні з передачею даних..

3.5.2. Енергетична ефективність внутрьо-кластерного зв'язку

Для внутрішньокластерного зв'язку енергоефективність MССMIMO є на тому ж рівні, що й в інших основних кластерах протоколу MAC. Це стає можливим завдяки використанню тільки традиційних методів SISO під час передачі. Проте, MССMIMO може працювати ефективніше, оскільки середня відстань між кластерами в MССMIMO зменшується, якщо розглядати середню відстань на один крок під час формування кластера.

3.5.3. Енергетична ефективність міжкластерного зв'язку

Згідно з освітніми матеріалами, використання спільних зв'язків MIMO може значно покращити енергетичну ефективність бездротових сенсорних мереж (WSN). У даному розділі ми розглянемо модель енергетичної ефективності MССMIMO і порівняємо її продуктивність з іншими

протоколами.

1) Енергетична модель зв'язку МІМО: Енергетичне споживання передачі МІМО в WSN включає дві складові: споживання всіх підсилювачів потужності (РРА) і інших системних блоків (РС).

Потужність підсилювача може бути апроксимована як потужність передачі (P_{out}) залежно від схеми модуляції і розміру сузір'я.

2) Модель зв'язку між кластерами: Для передачі пакета між членами різних кластерів в МССМІМО потрібно пройти п'ять проміжних етапів. Споживання енергії на біт для такої передачі може бути представлено формулою (8), де \bar{d}_{ch} позначає очікувану відстань між головкою кластера і її членами, а \bar{d}_{cc} - очікувану відстань між кооперативними передавачами і приймачами МІМО.

$$\bar{E}_{1-hop} = 3E_{siso}(\bar{d}_{ch}) + E_{miso}(\bar{d}_{ch})E_{mimo}(\bar{d}_{cc}) \quad (3.4)$$

Для зв'язку між двома членами кластера, розділеними більш ніж одним кластером, можна обчислити очікуване споживання енергії на біт за допомогою формули (3.4). Очікуване споживання енергії на біт для узгодженого протоколу МІМО, традиційних кластеризованих WSNs с безліччю переходів SISO, можна отримати так само, як показано нижче рис. 3.13 (b), (c) и (d) . Це пов'язано з тим, що для передачі пакета від однієї головки кластера до іншої завжди потрібно три передачі.

Для передачі на кілька кроків, споживання енергії на біт обчислюється за формулою (3.5), де кроки відображають кількість проміжних кластерів.

$$\bar{E}_{hops} = 2E_{siso}(\bar{d}_{ch}) + hops * E_{siso}(\bar{d}_{ch}) + hops(E_{miso}(\bar{d}_{ch}) + E_{mimo}(\bar{d}_{cc})) \quad (3.5)$$

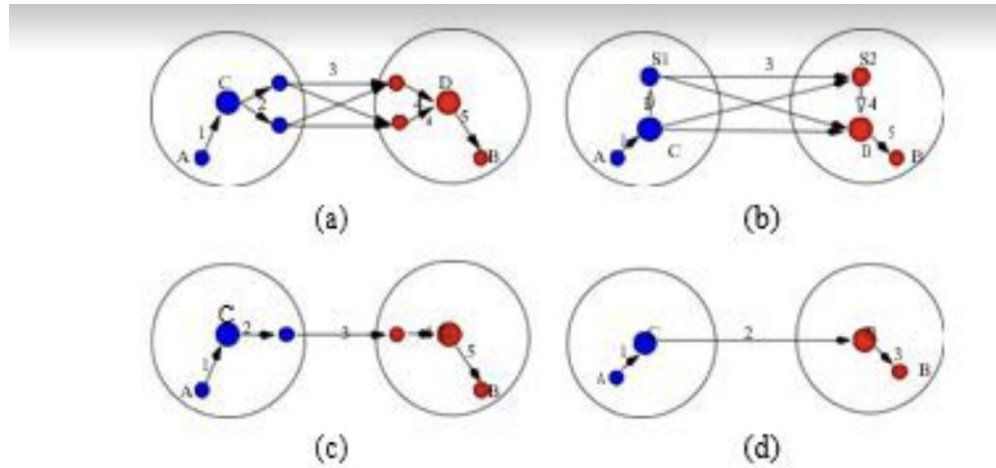


Рис. 3.13. Типові шляхи сполучень для зв'язку між членами кластера

вусідніх кластерах. (А) Сполучення шляхом МССМІМО; (Б) Шлях СМІМО; (С) Шляхом багато-інтервальної SISO; (Д) Шлях SISO з одним кроком.

Окремі рівняння та формули вище описують енергетичну ефективність та споживання енергії для спільних зв'язків МІМО в WSN та моделі зв'язку між кластерами.

3) У цьому розділі проведемо оцінку ефективності використання енергії протоколів МССМІМО та СМІМО шляхом числових розрахунків. Використовуючи моделювання, визначимо середню відстань між кластерними головками, членами кластерів і середню довжину кооперативних зв'язків МІМО. Також розрахуємо енергетичну ефективність схеми МССМІМО без використання передачі МІМО. Всі бездротові сенсорні мережі (WSN) генеруються на полі розміром $250 \text{ м} \times 250 \text{ м}$. [26]

Максимальний діапазон внутрішньокластерного зв'язку встановлюється на 50 м для одного набору експериментів, де середня розмір кластера становить 8. В іншому наборі експериментів максимальний діапазон встановлюється так, щоб середня розмір кластера був також 8. Максимальний діапазон міжкластерного зв'язку налаштовується на

мінімальну відстань, щоб зберегти всі кластерні зв'язки. Припускаємо, що використовується оптимальна схема модуляції та розмір сузір'я для кооперативних зв'язків МІМО. Енергетична ефективність МССМІМО порівняно з СМІМО наведена на рис. 3.14, використовуючи ті ж самі системні параметри. З результатів видно, що МССМІМО може заощадити приблизно 17% енергії на біт для WSN з 150 вузлами. Рис. 3.14 (а) показує, що енергія МССМІМО збільшується зі зростанням щільності вузлів, коли максимальний діапазон внутрішньокластерного зв'язку дорівнює 50. Це пов'язано зі збільшенням середньої відстані між кластерами через більшу кількість вузлів у кожному кластері. З рис. 3.14 (б) видно, що енергія МССМІМО зменшується зі зростанням щільності вузлів при середньому розмірі кластера 8, оскільки зменшується відстань від головки кластера до членів і довжина кооперативних зв'язків МІМО. Перевага МССМІМО з точки зору енергетичної ефективності над СМІМО стає менш очевидною при збільшенні щільності вузлів і зменшенні відстані передачі, так як перевага МІМО над SISO також зменшується.

Також була оцінена ефективність використання енергії МССМІМО порівняно з існуючими схемами для зв'язку між членами кластеру, які розташовані в різних кластерах. Згенеровано випадковим чином 150-вузлові WSN на полі $250 \text{ м} \times 250 \text{ м}$, використовуючи моделювання для визначення очікуваної відстані внутрішньокластерного зв'язку і довжини кооперативного зв'язку МІМО. Середній розмір кластера становить 8. З рис. 3.14 (с) видно, що МССМІМО завжди перевершує інші схеми з точки зору енергетичної ефективності, і ця перевага стає більш очевидною зі збільшенням кількості кроків.

3.6 Оцінка ефективності

У цьому підрозділі проведемо оцінку продуктивності протоколів

МССМІМО і СМІМО за допомогою моделювання та порівняємо їх результати. Для цього використовується симулятор NS-2, в якому реалізовані обидва протоколи. Проводяться три набори експериментів, які включають сценарії трафіку, усі кластерні зв'язки і міжкластерний трафік рівноправних вузлів, а також вплив зміни параметрів системи.

У симуляторі NS-2 розташовані випадковим чином 150 вузлів датчиків на полі розміром 250 м × 250 м. Середній розмір кластера становить приблизно 8, і максимальна відстань внутрішньокластерної передачі досягає 50 м для обох протоколів. Максимальна відстань міжкластерної передачі встановлена на 40 м для МССМІМО і 80 м для СМІМО, що забезпечує підключення до мережі. Варто відзначити, що максимальна міжкластерна відстань передачі для МССМІМО значно менша, ніж для СМІМО, через розташування кооперативних МІМО вузлів на кордоні кластерів у випадку МССМІМО, тоді як для СМІМО міжкластерні комунікації відбуваються між кластерними головками, які зазвичай знаходяться в центрі кластерів. Ширина пропускної здатності каналу зв'язку становить 2 Мбіт/с, а максимальний розмір пакета - 100 біт. Для членів кластера відведено 15 тимчасових інтервалів для фази головного кластера, кожен з яких триває 405 мкс.

Довжина фази від кластерної головки до членів кластера встановлена на 6 мс, а фази міжкластерного зв'язку - 8 мс. Кількість доступних каналів складає 5, а максимальний розмір конкуруючої фази CWfix - 32.

3.6.1. Рух усіх кластерів до потоку

У цьому наборі експериментів порівнюються сценарії МССМІМО і СМІМО, де трафік складається з віддаленості членів кластера до приймального вузла, розташованого всередині кластера. Для вивчення впливу положення приймача, вузол приймача поміщається випадково обраний кластер або кластер з максимальним рівнем.

У кожному кластері генерується максимум 1 потік CBR. Результати моделювання представлені на рис. 3.15, де МССМІМО-r-sink відноситься до випадку, коли приймач розміщений випадково вибраним кластером, а МССМІМО-m-sink означає, що приймач розміщений в кластері з максимальним рівнем. Аналогічні позначення використовуються для СМІМО. На рис. 3.15 (а) показана пропускна здатність систем МССМІМО і СМІМО при збільшенні кількості передавальних кластерів від 1 до 20 і швидкості передачі даних CBR 40 Кбіт/с.

Можна помітити, що пропускна здатність МССМІМО стабільно зростає приблизно до 160 Кбіт/с, тоді як пропускна здатність СМІМО залишається на рівні приблизно 50 Кбіт/с. При збільшенні кількості потоків CBR понад 2 спостерігається міжканальна інтерференція між кооперативними МІМО зв'язками, що пояснює це явище.

Пропускна здатність систем МССМІМО і СМІМО показана на рис. 3.15 (б), де присутні 20 потоків CBR і швидкість передачі даних CBR змінюється від 2 Кбіт/с до 40 Кбіт/с. Можна побачити, що МССМІМО досягає насичення пропускної здатності значно швидше, ніж СМІМО, при збільшенні швидкості передачі даних CBR. Варто відзначити, що більш висока пропускна здатність може бути досягнута для МССМІМО, коли вузол передавача даних знаходиться в кластері з максимальним рівнем. Це пов'язано з тим, що більші кооперативні МІМО зв'язки з'єднані з вузлом передавача даних, що дозволяє отримати більш узгоджену передачу в приймальний вузол.

На рис. 3.15 (с) і (д) розрахована середня наскрізна затримка в залежності від кількості потоків CBR і швидкості передачі даних CBR. Для МССМІМО, наскрізна затримка корелює з навантаженням на трафік, оскільки більшість пакетів поміщаються в чергу в активних кооперативних МІМО зв'язках, щоб уникнути конфліктів в перевантажених ситуаціях.

У СМІМО наскрізна затримка залишається низькою при великому навантаженні трафіку. Це пояснюється тим, що багато пакетів відкидається на початковому кластері через завади під час внутрішньокластерного і міжкластерного зв'язку і не потрапляє до черги.

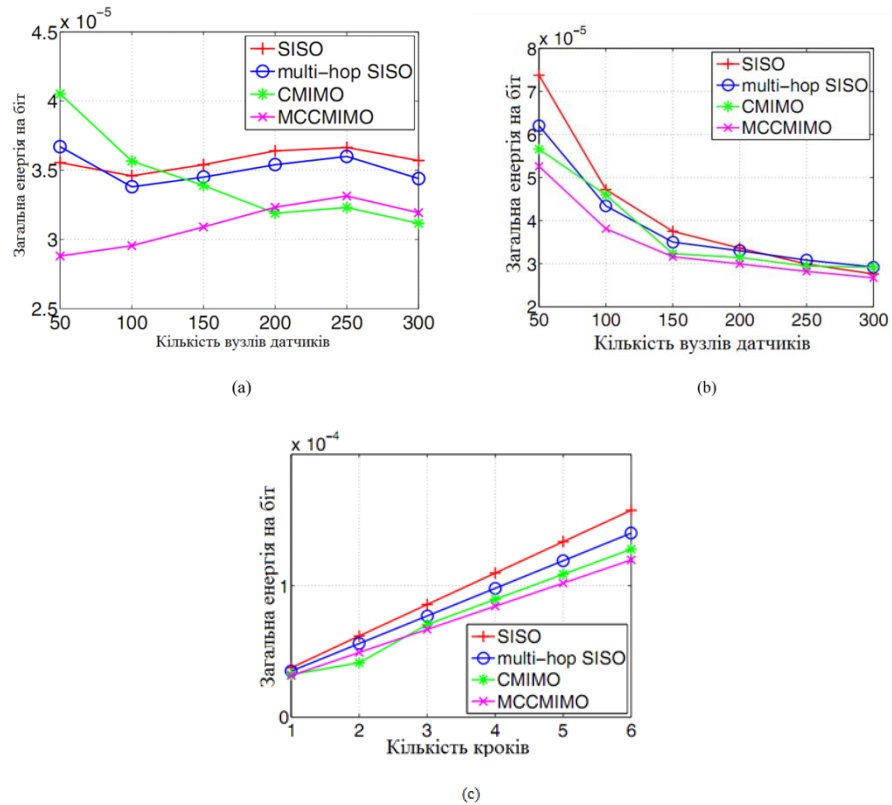


Рис. 3.14. Витрата енергії на біт для міжкластерних зв'язків у МССМІМО. (А) енергоефективність на 1-крок порівняно з кількістю вузлів датчиків з фіксованою максимальною відстанню передачі внутрьокластера; (Б) енергоефективність на 1-крок порівняно з кількістю вузлів датчиків з фіксованим середнім розміром кластера; (С) енергоефективність з декількома кроками порівняно з кроком кластерів з фіксованим числом вузлів датчиків і середнім розміром кластера.

3.6.2. Однополюсний міжкластерний рух

У цьому наборі експериментів порівнюються МССМІМО і СМІМО щодо пропускну здатності системи та наскрізної затримки в контексті

міжкластерного трафіку рівноправних вузлів локальної мережі (ЛВС). Кількість взаємодіючих кластерних пар змінюється від 1 до 10, і оцінюються випадки з 1 і 2 потоками СВР між кожною парою сполучених кластерів. Результати моделювання показані на рис. 3.16, де МССМІМО-1 відноситься до 1 потоку СВР, а МССМІМО-2 відноситься до 2 потоків СВР. Аналогічні позначення використовуються для СМІМО. З рис. 3.16 (а) видно, що МССМІМО досягає пропускної здатності понад 150 Кбіт/с для 2 потоків СВР, що перевищує більш ніж в 5 разів пропускну здатність СМІМО.

При збільшенні кількості СВР потоків між кожною кластерною парою з 1 до 2, МССМІМО досягає ще вищої пропускної здатності, тоді як пропускну здатність СМІМО залишається приблизно на тому ж рівні. Це пов'язано з тим, що кооперативний МІМО вже насичений в потоці 1 СВР через сильні перешкоди в каналі кооперації СМІМО. Середня наскрізна затримка для МССМІМО і СМІМО показана на рис. 3.16 (б). [30]

Тенденції схожі зі сценарієм трафіку з багатьма кластерами та потоками. Проте, можна помітити, що затримка для МССМІМО при максимальному навантаженні трафіку менша порівняно з попереднім сценарієм. Це раціонально, оскільки навантаження міжкластерного трафіку розподіляються по всіх кооперативних зв'язках МІМО в цьому сценарії, а також конвертуються в кооперативні МІМО зв'язки біля вузла приймача у попередньому сценарії..

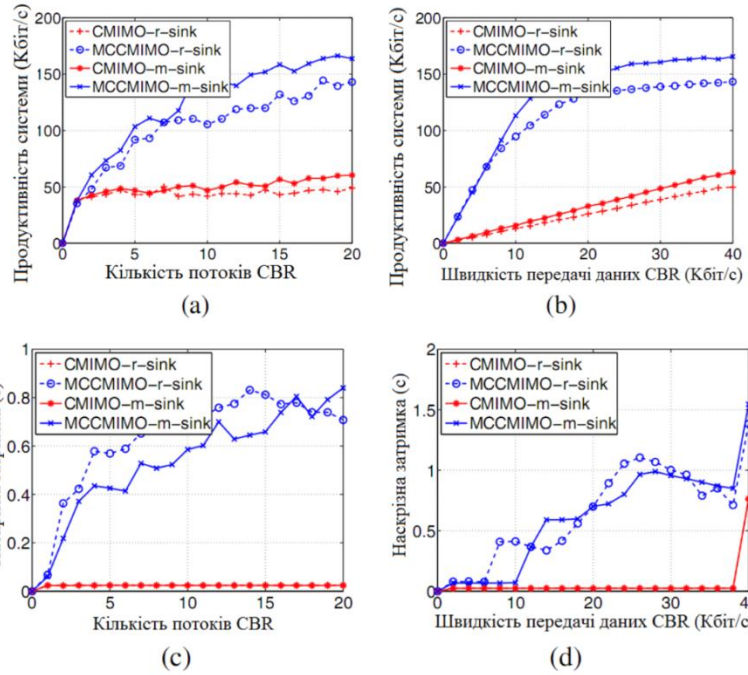


Рис. 3.15. Результати моделювання для сценарія трафіку з використанням всіх кластерів. (а) продуктивність системи в залежності від кількості потоків CBR; (б) продуктивність системи в залежності від швидкості передачі даних CBR; (с) наскрізна затримка в залежності від кількості потоків CBR; (д) наскрізна затримки в залежності від швидкості передачі даних CBR.

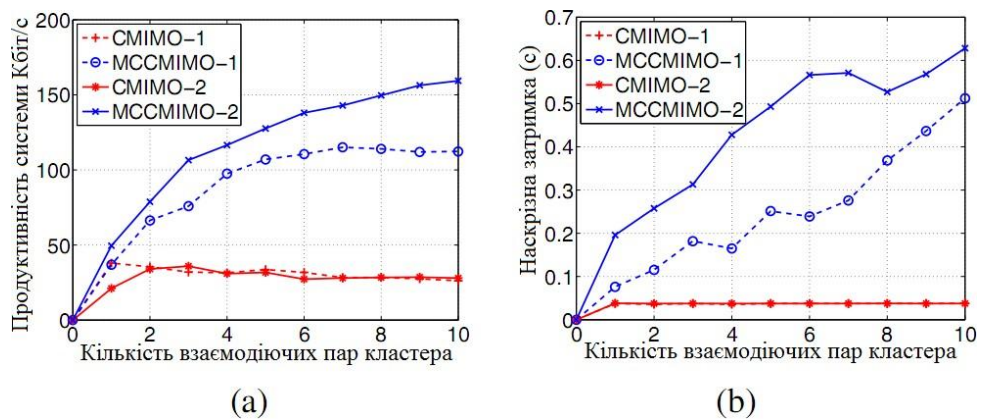


Рис. 3.16. Результати моделювання для однорангового сценарія міжкластерного трафіку. (а) Продуктивність системи в залежності від кількості взаємодіючих пар кластера; (б) Наскрізна затримка в залежності від кількості взаємодіючих пар кластера.

3.6.3. Вплив параметрів системи

У цьому наборі експериментів проведено дослідження впливу кількості доступних каналів та максимального розміру етапу на продуктивність МССМІМО. У мережі окремо застосовано 20 потоків СВР протоколу для всіх кластерів та 10 однакових СВР потоків.

По-перше, кількість доступних каналів змінюється в діапазоні від 1 до 11. Пропускна здатність системи показана на рис. 3.17. У випадку R-приймача даних приймач розміщений випадковим чином, у випадку M-приймача даних приймач розміщений в максимальному ступені кластера, а P2P є сценарієм однорангового трафіку.

За результатами можна побачити, що в усіх кластерних сценаріях руху пропускна здатність системи збільшується, коли призначаються більше ресурсів каналу, що призводить до зменшення перешкод в суміщеному каналі. Однак пропускна здатність перестає зростати після використання 9 каналів, оскільки відсутність завад не дозволяє подальшому збільшенню.

По-друге, максимальний розмір етапу твердження змінюється від 2 до 64, а результати моделювання показані на рис. 3.17 (б). Очевидно, що існує компроміс між пропускною здатністю системи та максимальним розміром конкуруючої фази. Збільшення розміру етапу розбрату допомагає уникнути зіткнень, але при цьому пропускна здатність каналу зменшується через збільшену конкуруючу фазу. Оптимальний розмір конкуруючої фази залежить від конкретного сценарію трафіку.

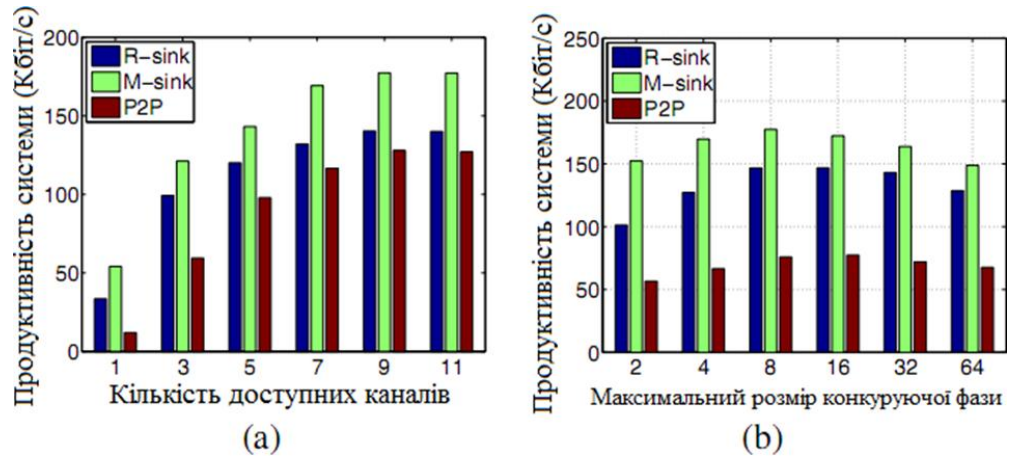


Рис. 3.17. Продуктивність системи для зміни параметрів системи.

- (a) Продуктивність системи в залежності від кількості доступних каналів;
 (b) Продуктивність системи в залежності від максимального розміру етапу конкуренції.

Висновки:

У даному розділі було розроблено ефективний протокол MAC з високою пропускною здатністю, відомий як MCCMIMO, що використовує багато каналів як кооперативну MIMO систему.

В рамках MCCMIMO, сенсорні вузли групуються в кластери з використанням нової метрики, і для зв'язку між сусідніми кластерами використовуються різні кооперативні MIMO зв'язки. З метою уникнення конфліктів і впливу завад, використовуються різні канали для сусідніх кластерів та кооперативних MIMO зв'язків, які взаємно перешкоджають один одному. Також був розроблений механізм контролю доступу до середовища, який використовує схему TDMA для внутрішньокластерного зв'язку з метою уникнення підслуховування та зменшення колізій.

Для міжкластерного зв'язку застосовується синхронізація CSMA/CA. Також було проведено числовий аналіз та моделювання, результати яких свідчать про значне поліпшення енергетичної ефективності та пропускної здатності системи порівняно з іншими схемами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Вивчено сучасні бездротові технології з врахуванням їх порівняльних характеристик залежно від поставлених вимог. За результатами порівняння встановлено, що технологія ZigBee, яка базується на стандарті IEEE 802.15.4 і відома як "мережі сенсорів", відрізняється найбільшою кількістю вузлів та найтривалішою автономною роботою. Також проведено детальний аналіз особливостей бездротових мереж сенсорів.

Сенсори складаються з наступних підсистем: приймання, обробки даних, моніторингу, комунікації та джерела живлення. Вони функціонують як самостійні пристрої і можуть житися від об'єктів моніторингу, сигналізаційних пультав або внутрішньої батареї, що є найбільш ефективним в критичних ситуаціях. Передача даних відбувається шляхом маршрутизації інформації до найближчого вузла, а не до базової станції або точки доступу, як у традиційних мережах з фіксованою інфраструктурою. Ці мережі відомі як багатохопові. Розглянуто важливі аспекти, які необхідно враховувати при створенні надійних мереж сенсорів, такі як стійкість, масштабованість, топологія та енергоспоживання.

Можливість бездротових мереж сенсорів адаптуватися до вирішення широкого спектру завдань, а також використання останніх наукових та технологічних досягнень робить їх передовою технологією з мережування, що може призвести до розвитку широкого ринку бездротових мереж сенсорів.

Наведено основні переваги систем, що базуються на мережах сенсорів, які знайшли застосування у телекомунікаційній галузі. Також проведена оцінка ролі бездротових мереж сенсорів не лише у різних галузях виробництва та природних областях, але й у повсякденному житті людини. Велика кількість застосувань, заснованих на бездротових мережах сенсорів,

сприятиме покращенню якості життя та комфорту людей. Моніторинг навколишнього середовища дозволить мати достатньо повну інформацію про нього, що сприятиме надійним прогнозам, оптимізації взаємодії людини з природою. Це не тільки підвищить безпеку та комфорт людей, а й зменшить негативний вплив людської діяльності на довкілля.

В даному розділі розглядається модель системи зв'язку з використанням декількох передавальних та прийомних антен (MIMO - Multiple-Input-Multiple-Output). Ця модель є розширенням систем SIMO і MISO, де використовується багато передавальних та прийомних антен.

Також аналізуються різні моделі каналу зв'язку, які використовуються для аналізу систем MIMO. Показані схематичні конфігурації багатоантенних систем. Визначено чотири позитивні властивості систем MIMO:

- Підвищення стійкості системи (зменшення ймовірності помилки).
- Підвищення швидкості передачі інформації в системі.
- Збільшення зони покриття.
- Зменшення необхідної потужності передавача.

Також наведено узагальнення відомої формули Шеннона для пропускної здатності каналу зв'язку в системі MIMO.

У розділі розроблено високопродуктивний протокол MAC з високою пропускною здатністю, відомий як MCCMIMO, що використовує багатоантенні канали як кооперативний MIMO. У MCCMIMO сенсорні вузли організовані в кластери за допомогою нової метрики, і для зв'язку між сусідніми кластерами використовуються різні кооперативні MIMO зв'язки.

Для уникнення зіткнень і завад призначаються різні канали для сусідніх кластерів та кооперативних MIMO зв'язків, які впливають один на одного. Було запропоновано механізм контролю доступу до середовища, який використовує схему TDMA для внутрішньокластерного зв'язку для уникнення підслуховування та зменшення колізій.

Для міжкластерного зв'язку використовується синхронізація CSMA/CA. Також проведений чисельний аналіз та моделювання, які показують, що МССМІМО може значно покращити енергоефективність та пропускну здатність системи порівняно з іншими схемами. Наприклад, для бездротових сенсорних мереж з 150 вузлами в полі розміром 250 м × 250 м з п'ятьма або більше доступними каналами, протокол може досягти більш ніж у три рази вищої пропускну здатності, заощаджуючи до 17% енергії на біт для міжкластерного зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І. В. «Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник» – К.: НАУ, 2017. – 212 с. ISBN 978-966-932-063-6 .
2. Лисенко О.І., Алексєєва І.В. Дослідження операцій. Конспект лекцій. — К: НТУУ «КП», 2016. – 196 с.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Наукова думка, 2017. – 730 с
4. Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М.Ю.Ільченка, С.О.Кравчука: монографія. - Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019.- 336 с. Рекомендовано до друку ВР КПІ ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2
5. Глоба Л.С., Дяденко О.М., Пилипенко А.Ю., Скулиш М.А. Математичні методи аналізу та керування телекомунікаційними мережами. К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2017. – 234 с.
6. Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course [S084-Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017.
<https://www.hufocw.org/Course/263>
7. Lysenko Oleksandr. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course "Digital automatic control systems for information communications engineers", 14 Lectures. Spring 2020
<https://www.hufocw.org/Course/197>
8. Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці: Методичні рекомендації до виконання практичних занять [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172

«Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 46 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41977>

9. Основи теорії цифрових систем автоматичного керування: LTI моделі для систем SISO та MIMO [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 196 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41978>

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

11. C.Siva Ram Murthy, B.S.Manoj —Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols, Prentice Hall, 2004, 880p.

12. MIMO System Technology for Wireless Communication / Edited by George Tsoulos. – USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006. — 378 p.

13. Jankiraman M. Space-Time Codes and MIMO systems. — USA, MA: ArtechHouse, 2004. — 327 p.

14. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. — Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2005. — 323 p.

15. Biglieri E., Calderbank R., Constantinides A., Goldsmith A., Paulraj A. and Poor H.V. MIMO Wireless Communication. — Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2007. — 323 p.

16. Andrews J.G., Ghosh A., Muhamed R. Fundamentals of WiMax. Understanding Broadband Wireless Networking. — USA, Boston:

Prentice Hall, 2007. - 449 p.

17. Telatar E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels // European Transactions on Telecommunications. 1999. Vol. 10, No. 6. P. 585-595.
18. Arogyaswami P., Nabar R., Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications. — Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
19. X. Chen, P. Han, Q. He, S. Tu and Z. Chen, "A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks. in computer and information technology," Proc. of Sixth IEEE International Conference on Computer and Information Technology, September 2006.
20. IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE) 2016
21. Beamspace SU-MIMO for Future Millimeter Wave Wireless Communications Qing Xue; Xuming Fang; Cheng-Xiang Wang IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2017
22. G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He, J. A. Stankovic and T. F. Abdelzaher, "MMSN: multi-frequency media access control for wireless sensor networks," IEEE INFOCOM, April 2006.
23. Y. Wu, M. Keally, G. Zhou and W. Mao, "Traffic-aware channel assignment in wireless sensor networks," Proc. of the 4th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications, pp. 479-488, 2009.
24. S. Gandham, M. Dawande and R. Prakash, "Link scheduling in sensor networks: distributed edge coloring revisited," IEEE INFOCOM, March 2005.
25. J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S.H. Son and J.A. Stankovic, "TMMAC: an energy efficient multi-channel MAC protocol for ad hoc

networks, *IEEE ICC*, pp.3554-3561, June 2007.

26. K.R. Chowdhury, P. Chanda, D.P. Agrawal and Q. Zeng, "DCA-a distributed channel allocation scheme for wireless sensor networks," *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1297-1301, September 2005.

27. Y. Wu, J. Stankovic and T. He, "Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks," *IEEE INFOCOM*, 2008.

28. C. Shuguang, A.J. Goldsmith and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1089-1098, 2004.

29. S.K. Jayaweera, "Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Communications*, pp.984-989, May 2006

30. T.D. Nguyen, O. Berder and O. Sentieys, "Cooperative MIMO schemes optimal selection for wireless sensor networks," *IEEE Vehicular Technology Conference 2007*, pp. 85-89, April 2007

31. Y. Yuan, M. Chen and T. Kwon, "A novel cluster-based cooperative MIMO scheme for multi-hop wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, April 2006.

32. M. Siam, M. Krunz and O. Younis, "Energy-efficient clustering/routing for cooperative MIMO operation in sensor networks," *IEEE INFOCOM*, 2009.

33. Raniwala, K. Gopalan and T.-C. Chiueh, "Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks," *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, no. 2, pp. 50-65, April 2004.