

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
В.о. завідувача кафедри

_____ Явісія В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018_р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

на тему: Метод вибору точки збору інформації в літаючих сенсорних системах

Виконала: студентка 2 курсу, групи ТЗ-71мп
(шифр групи)

_____ Ярмола Ірина Анатоліївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ професор, д.т.н., Лисенко О.І. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

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

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

Студент _____
(підпис)

ЗМІСТ

1. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІТАЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	9
1.1 Огляд безпроводових сенсорних мереж.....	9
1.2 Застосування та проблеми проектування безпроводової сенсорної мережі.....	11
1.3 Структура сенсора та безпроводової сенсорної мережі	15
1.4 Протоколи і алгоритми безпроводової сенсорної мережі	16
1.5 Огляд літаючих сенсорних мереж	24
Висновки до розділу	28
2. АНАЛІЗ РАДІОМЕРЕЖ З САМООРГАНІЗАЦІЄЮ	30
2.1 Основні особливості мереж, що самоорганізуються.....	30
2.2 Класифікація радіомереж з самоорганізацією	33
2.3 Основні проблеми радіомереж, що самоорганізуються.....	36
2.4 Переваги та перспективи мереж з самоорганізацією	38
Висновки до розділу	42
3. АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛСМ НА ОСНОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ	44
3.1 Особливості побудови та функціонування ЛСМ на основі ТА.....	45
3.2 Методи передачі інформації в ЛСМ з ТА	48
3.3 Загальна характеристика протоколів канального рівня	51
3.4 Аналіз методів підвищення пропускної здатності ЛСМ із застосуванням ТА	56
Висновки до розділу	58
4. МЕТОД ВИБОРУ ТОЧКИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ В ЛІТАЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	59
4.1 Побудова математичних моделей оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мережах з телекомунікаційними аероплатформами.....	59
4.2 Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах літаючих сенсорних мережах з телекомунікаційними аероплатформами	61
4.3 Дослідження ПЗ в каналах літаючих сенсорних мережах	62
4.4 Дослідження затримки передачі в літаючих сенсорних мережах	65
4.5 Результати моделювання	68

Висновки до розділу	77
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Англійські скорочення

APTEEN	(Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network) – симетричний алгоритм блочного кодування
LAN	(Local Area Network) – локальна мережа
LEACH	(Low Energy Adaptive Clustering) – ієрархічний алгоритм адаптивної кластеризації з низьким рівнем використанням енергії
MEMS	(Micro-Electro-Mechanical Systems) – мікроелектромеханічні системи
MANET	(Mobile Ad-hoc Network) – бездротова децентралізована самоорганізована мережа з мобільних пристроїв
NGN	(Next Generation Network) – мережа наступного покоління
OSA	(Open Services Access) – відкритий доступ сервісів
PAN	(Personal Area Network) – персональна мережа
PEGASIS	(The Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) – алгоритм ефективного збору в сенсорних системах
SPIN	(Sensor Protocols for Information via Negotiation) – сенсорні протоколи для інформації через переговори
TEEN	(Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network) – протокол з порогом чутливості енергоефективної мережі
QoS	(Quality of Service) – якість обслуговування
VANET	(Vehicular Ad-Hoc Network) – автомобільна спеціальна мережа
UWB	(Ultra-Wide Band) – ультраширокий діапазон
WAN	(Wide Area Network) – широкосмугова мережа

Українські скорочення

АПР	адаптивний протокол із резервуванням
БПЛА	безпілотний літальний апарат
БС	базова станція
БСМ	безпроводова сенсорна мережа
БМТ	безпроводова мережа тіла

ГАД	географічна адаптивна достовірність
ЛСМ	літаюча сенсорна мережа
МА	мобільний абонент
МД	множинний доступ
МДСЗ	множинний доступ із сигналом «зайнято»
МСР	мережі із самоорганізацією
ПЗ	пропускна здатність
СМО	сервер можливостей обслуговування
СУ	система управління
ТА	телекомунікаційна аероплатформа

ВСТУП

Технології безпроводового зв'язку та прогрес в області виробництва мікросхем дозволили протягом останнього десятиріччя перейти до впровадження та практичної розробки нового класу розподілених комунікаційних систем - сенсорних мереж.

Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) отримали всесвітню увагу в останні роки, особливо зі швидким збільшенням в технології Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), яка спростила розробку літаючих сенсорів.

Вихід за межі можливостей традиційних мереж зв'язку, обумовлений характером сьогоденного мультимедійного трафіка і потребами в мультисервісному його обслуговуванні, привів до якісного перетворення всієї мережевої структури, внаслідок чого з'явилася концепція мережі наступного покоління NGN (Next Generation Network). Поява концепції та створення мереж нового покоління дозволить значно розширити горизонти діяльності та збільшити спектр послуг.

Україна, будучи частиною світової телекомунікаційної спільноти, продовжує впроваджувати новітні технології, що сприяє зміцненню економіки та дозволяє удосконалювати інформаційну базу суспільства.

Надзвичайні ситуації природного й техногенного характеру, військові конфлікти, які все частіше мають місце у нашому світі, призводять до повного або часткового виходу з ладу наземної інфраструктури, у тому числі телекомунікаційних споруд (базових станцій стільникового зв'язку, радіорелейних та супутникових станцій, кабельних ліній та ін.). Оперативне забезпечення зв'язку в підрозділах рятувальних бригад та інших мобільних служб у таких ситуаціях можливе шляхом розгортання мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА). Абоненти таких мереж можуть вільно переміщуватись в заданому районі та з'єднуватись між собою безпосередньо – у зоні радіо видимості, або із ретрансляцією пакетів через сусідні сенсори (тобто виконуючи функції маршрутизації), утворюючи таким чином багатоланкові мережі довільної структури. Збільшення зони покриття МБСМ можливо шляхом ієрархічної

просторової організації мережі із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ різних рівнів, що виконують роль ретрансляторів, поєднуючи між собою віддалених абонентів. Особливо актуально застосування телекомунікаційних аероплатформ на основі мініатюрних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що більш оперативні та економічні на відміну від великих аероплатформ.

Топологія таких мобільних радіомереж має динамічний характер та дуже стрімко розвивається, а отже потребує ефективної системи управління (СУ), що могла б швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, забезпечуючи ті чи інші цілі управління. Такими цілями управління можуть бути забезпечення зв'язності (структурної надійності), якості маршрутів передачі даних між абонентами (QoS), підвищення пропускної здатності мережі та ін. Управляючими параметрами у даному випадку можуть виступати потужність передавачів, спрямованість ДН наземних і бортових антен, навантаження, взаємне положення сенсорів та ін. Недостатньо розв'язаною на сьогодні є задача оптимального оперативного розміщення множини телекомунікаційних аероплатформ для підвищення пропускної здатності мережі із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних абонентів. Запропоновані на сьогодні методи, що закладаються в СУ топологією (місцеположенням) ТА, вирішують лише часткові задачі забезпечення геометричної зв'язності роз'єднаних компонентів мережі, не враховуючи обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження та обслуговування пакетів в сенсорах мережі. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, не враховуючи характер мобільності абонентів та маневреність БПЛА, а отже підлягають вдосконаленню. Існуючі методи планування наземних радіомереж також не ефективні, оскільки мають велику складність та час обчислення, що не дозволяє БПЛА відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Мета роботи: проаналізувати особливості побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж та літаючих сенсорних мереж. Розглянути спосіб вибору точки збору інформації в літаючих сенсорних мережах. Розробка методики оцінки показників ефективності функціонування літаючих сенсорних мереж, яку можна використати для управління положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів.

Наукові задачі досліджень:

1. Проаналізувати основні особливості функціонування мереж, що самоорганізуються.

2. Проаналізувати принципи функціонування літаючих сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ.

3. Дослідити математичні моделі оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами, а саме пропускну здатність та середню затримку передачі між заданою парою відправник-отримувач

Об'єкт досліджень – процес функціонування літаючих сенсорних мереж із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ.

Предмет досліджень – методи оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мереж із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ.

1. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІТАЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Огляд безпроводових сенсорних мереж

Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) можуть бути визначені як самоконфігуровані і безпроводові мережі, що не мають інфраструктури для моніторингу фізичних або екологічних умов, таких як температура, звук, вібрація, тиск, рух або забруднюючі речовини та спільно передавати свої дані через мережу для основного місця розташування або приймача, де дані можна спостерігати і аналізувати.

Приймач або базова станція (БС) діють як інтерфейс між користувачами і мережею. Можна отримати необхідну інформацію з мережі, ввівши запит і зібравши результати приймача. Зазвичай БСМ містить сотні тисяч сенсорів. Сенсори можуть зв'язуватися між собою за допомогою радіосигналів. Безпроводовий сенсор обладнаний сенсорами і обчислювальними пристроями, радіо-приймачами і компонентами живлення.

Окремі сенсори в БСМ за своєю суттю обмежені ресурсами: вони мають обмежену швидкість обробки, ємність зберігання і комунікаційну пропускну здатність. Після того, як сенсор розгорнутий, він відповідальний за самоорганізацію належної мережевої інфраструктури часто зі зв'язком мультитранзитної ділянки з ними. Тоді вбудовані сенсори починають збирати необхідну інформацію. Безпроводові сенсорні пристрої також реагують на запити, надіслані від "сайту управління", щоб виконати конкретні інструкції або надання пробних зразків. Режим роботи сенсорів може бути або безперервною, або керованою подією. Система глобального позиціонування (GPS) і локальні алгоритми розташування можуть використовуватися, щоб отримати інформацію про місцезнаходження і розташування. Безпроводові сенсорні пристрої можуть бути обладнані приводами, щоб "діяти" за певних умов. Ці мережі іноді більш конкретно називаються як безпроводовий сенсор чи мережі приводу [1].

БСМ дозволяють використовувати нові програми і вимагають нетрадиційних парадигм для розробки протоколу через декілька обмежень. У зв'язку з вимогою низької складності пристрою і низьким споживанням енергії (тобто тривалий час життя мережі) необхідно знайти належний баланс між можливостями зв'язку та обробки сигналів / даних.

В даний час велика частина досліджень БСМ зосереджена на розробці енергетичних і обчислювально- ефективних алгоритмів та протоколів, а область застосування обмежується просто орієнтованими на дані програми моніторингу та звітності. Деякі автори пропонують алгоритм переходу по кабелю (СМТ), який визначає мінімальну кількість активних сенсорів для підтримки К-покриття місцевості, а також К-зв'язності мережі. Зокрема, він виділяє періоди бездіяльності для сенсорів кабелю, не зачіпаючи вимоги до охоплення і підключення мережі, побудовані лише на місцевій інформації. Також була запропонована структура мережі збору даних з затримкою для БСМ. Мета запропонованої структури мережі зводиться до мінімізації затримок в процесах збору даних БСМ, які продовжують термін служби мережі. Інші автори розглянули ретрансляційні сенсори для зменшення геометричних недоліків в мережі і використовували алгоритми на основі оптимізації ройових частинок (PSO) для визначення оптимального місця розташування приймача по відношенню до цих сенсорів ретранслятора для подолання проблеми часу життя. Енергоефективна комунікація також була розглянута, автори запропонували геометричне рішення для визначення оптимального розміщення приймача для максимального збільшення часу життя мережі.

У більшості випадків дослідження БСМ розглядали однорідні сенсори. Але в даний час дослідники зосередилися на гетерогенних сенсорних мережах, де сенсори відрізняються один від одного за своєю енергією. Також було розглянуто проблему розгортання сенсорів ретранслятора для забезпечення відмовостійкості з більш високим мережевим підключенням в гетерогенних безпроводових сенсорних мережах, де сенсори мають різні радіуси передачі.

Нові мережеві архітектури з гетерогенними пристроями і недавнє просування в цій технології усувають існуючі обмеження і значно розширюють спектр можливих програм для БСМ, і все це змінюється дуже швидко [2].

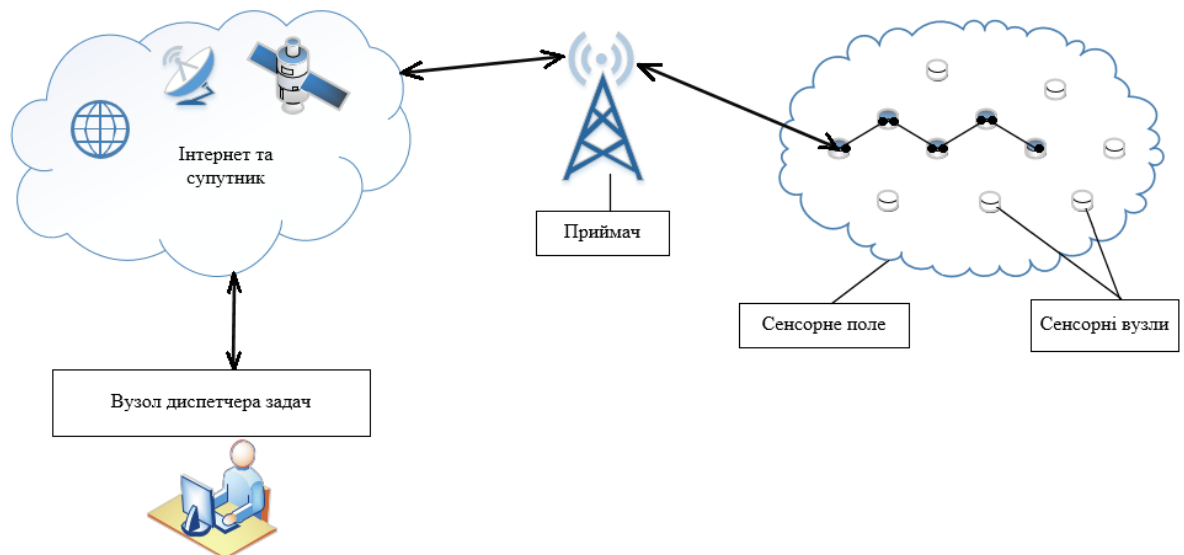


Рис. 1.1 Типова безпроводова сенсорна мережа

1.2 Застосування та проблеми проектування безпроводової сенсорної мережі

Безпроводові сенсорні мережі набули значної популярності через їх гнучкість у вирішенні проблем в різних областях застосування і вони мають потенціал для зміни нашого життя. БСМ були успішно застосовані в різних областях застосування такі як [3]:

- 1) Військові програми: БСМ, ймовірно, є невід'ємною частиною військового командування, управління, зв'язку, обчислювальної техніки, розвідки, систем спостереження за бойовими діями, систем розвідки і прицілу.
- 2) Моніторинг області: при моніторингу області сенсори розгортаються в регіоні, де необхідно контролювати будь-яке явище. Коли сенсори виявляють контрольовану подію (тепло, тиск і т. д.), подія повідомляється на одну з базових станцій, яка потім вживає відповідних заходів.

- 3) Транспортування: інформація про рух збирається БСМ в режимі реального часу для подальшої передачі транспортних шляхів і попередження водіїв про проблеми руху та заторів.
- 4) Медичні програми: деякі з програм охорони здоров'я для сенсорних мереж підтримують інтерфейси для людей з обмеженими можливостями, інтегрований моніторинг пацієнтів, діагностику та введення лікарських засобів в лікарнях, телемоніторинг фізіологічних даних людини, а також відстеження та моніторинг лікарів або пацієнтів в лікарні.
- 5) Екологічне зондування: термін «Екологічні сенсорні мережі» розроблений для охоплення багатьох застосувань БСМ для досліджень в області земної науки. Сюди входять зондування вулканів, океанів, льодовиків, лісів і т. д. Нижче перераховані деякі інші основні області:
- Моніторинг забруднення повітря
 - Виявлення лісових пожеж
 - Моніторинг парникових газів
 - Виявлення зсувів
- 6) Структурний моніторинг: безпроводові сенсори можуть використовуватися для моніторингу руху всередині будівель та інфраструктури, таких як мости, естакади, набережні, тунелі і т. д., що дозволяє інженерам дистанційно відстежувати активність без необхідності відвідування місця.
- 7) Промисловий моніторинг: БСМ були розроблені для технічного обслуговування на основі обладнання (СВМ), оскільки вони забезпечують значну економію коштів і забезпечують нові функціональні можливості. У провідних системах установка достатньої кількості сенсорів часто обмежується вартістю провідного з'єднання.
- 8) Сільськогосподарський сектор: використання безпроводових мереж звільняє фермера від обслуговування провідного з'єднання в складних умовах. Автоматизація іригації забезпечує більш ефективне використання води та скорочення відходів.

Існує безліч проблем, пов'язаних з розгортанням сенсорних мереж, які є над безліччю тих, які зустрічаються в безпроводових однорангових мережах. Сенсори обмінюються даними по безпроводових лініях з втратами без інфраструктури. Додаткова проблема пов'язана з обмеженням, зазвичай не поновлюваних енергопостачанням сенсорів. Щоб максимізувати термін служби мережі, протоколи повинні бути розроблені з самого початку з метою ефективного управління енергоресурсами [4].

- Відмовостійкість: сенсори уразливі і часто розгортаються в небезпечному середовищі. Вони можуть вийти з ладу через проблеми з обладнанням або фізичного пошкодження або через виснаження їх енергопостачання. Очікується, що відмови сенсорів будуть набагато вище, ніж зазвичай розглядаються в провідних чи інфраструктурних безпроводових мережах. Протоколи, розгорнуті в сенсорній мережі, повинні мати можливість виявляти ці збої якомога швидше і бути досить міцними, щоб обробляти відносно велику кількість відмов при збереженні загальної функціональності мережі. Це особливо важливо для дизайну протоколу маршрутизації, який повинен гарантувати, що альтернативні шляхи доступні для перенаправлення пакетів. Різні середовища розгортання створюють різні вимоги до відмовостійкості.
- Масштабованість. Мережі сенсорів варіюються в масштабі від декількох сенсорів до потенційно кількох сотень тисяч. Крім того, щільність розгортання також є змінною. Для збору даних з високою роздільною здатністю щільність сенсорів може досягати рівня, коли сенсор має кілька тисяч сусідів в своєму діапазоні передачі. Протоколи, розгорнуті в сенсорних мережах, повинні бути масштабованими до цих рівнів і мати можливість підтримувати адекватну продуктивність.
- Витрати на виробництво. Оскільки багато моделей розгортання розглядають сенсори як одноразові пристрої, сенсорні мережі можуть конкурувати з традиційними підходами до збору інформації, тільки якщо

окремі сенсори можуть бути виготовлені дуже дешево. Цільова ціна, передбачена для сенсора, в ідеалі повинна бути менше 1 долара США.

- Апаратні обмеження. Як мінімум, кожен сенсор повинен мати вимірювальний блок, блок обробки, блок передачі і джерело живлення. За бажанням, сенсори можуть мати кілька вбудованих датчиків або додаткових пристроїв, таких як система локалізації, для забезпечення маршрутизації, орієнтованої на розташування. Проте, кожна додаткова функціональність поставляється з додатковими витратами і збільшує споживання енергії і фізичний розмір сенсора. Таким чином, додаткова функціональність повинна бути завжди збалансована в порівнянні з витратами і потребами малої потужності.
- Топологія сенсорної мережі: хоча БСМ розвивалися в багатьох аспектах, вони як і раніше є мережами з обмеженими ресурсами з точки зору енергії, обчислювальної потужності, пам'яті та комунікаційних можливостей. З цих обмежень споживання енергії має першорядне значення, що підтверджується великою кількістю алгоритмів, методів і протоколів, які були розроблені для економії енергії і тим самим продовжують термін служби мережі. Топологія технічного обслуговування - одна з найбільш важливих проблем, спрямованих на зниження споживання енергії в БСМ.
- Засоби передачі: зв'язок між сенсорами зазвичай здійснюється за допомогою радіозв'язку по популярним діапазонами ISM. Однак деякі сенсорні мережі використовують оптичний або інфрачервоний зв'язок, причому останній має ту перевагу, що є надійним і практично не містить перешкод.
- Споживана потужність. Багато проблем сенсорних мереж обертаються навколо обмежених енергоресурсів. Розмір сенсорів обмежує розмір батареї. Для розробки програмного і апаратного забезпечення необхідно ретельно враховувати питання ефективного використання енергії. Наприклад, стиснення даних може зменшити кількість енергії, використовуваної для радіопередачі, але використовує додаткову енергію

для обчислення та/або фільтрації. Енергетична політика також залежить від програм; у деяких програмах могло б бути прийнятно відключити підмножину сенсорів, щоб зберегти енергію, в той час як інші програми вимагають одночасного використання всіх сенсорів [5].

1.3 Структура сенсора та безпроводової сенсорної мережі

Сенсор складається з чотирьох основних компонентів, таких як: вимірювальний блок, блок обробки, блок приймача та блок живлення (рис 1.2). Він також має залежні від програм додаткові компоненти, такі як система позиціонування, генератор енергії і мобілізатор. Сенсорні пристрої зазвичай складаються з двох субодиноць: сенсорів та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Аналогові сигнали, створені сенсорами, перетворюються в цифрові сигнали за допомогою АЦП, а потім подаються в блок обробки. Процесор, як правило, пов'язаний з невеликим блоком зберігання, і він може управляти процедурами, які змушують сенсор взаємодіяти з іншими сенсорами для виконання призначених завдань розпізнавання. Приймач з'єднує сенсор з мережею. Одним з найбільш важливих компонентів сенсора є блок живлення. Блоки живлення можуть підтримуватися блоком очищення енергії, таким як сонячні елементи. Інші субодиноці сенсора залежать від програм.

Функціональна блок-схема універсального безпроводового сенсора представлена на рис 1.3. Модульний підхід до проектування забезпечує гнучку і універсальну платформу для задоволення потреб широкого кола програм. Наприклад, в залежності від сенсорів, які потрібно розгорнути, блок формування сигналу може бути запрограмований або замінений. Це дозволяє використовувати широкий діапазон різних сенсорів з безпроводовим сенсором. Аналогічним чином, радіолінія може бути замінена, як потрібно для вимог діапазону безпроводових мереж, і необхідності в двонаправленому зв'язку [7].

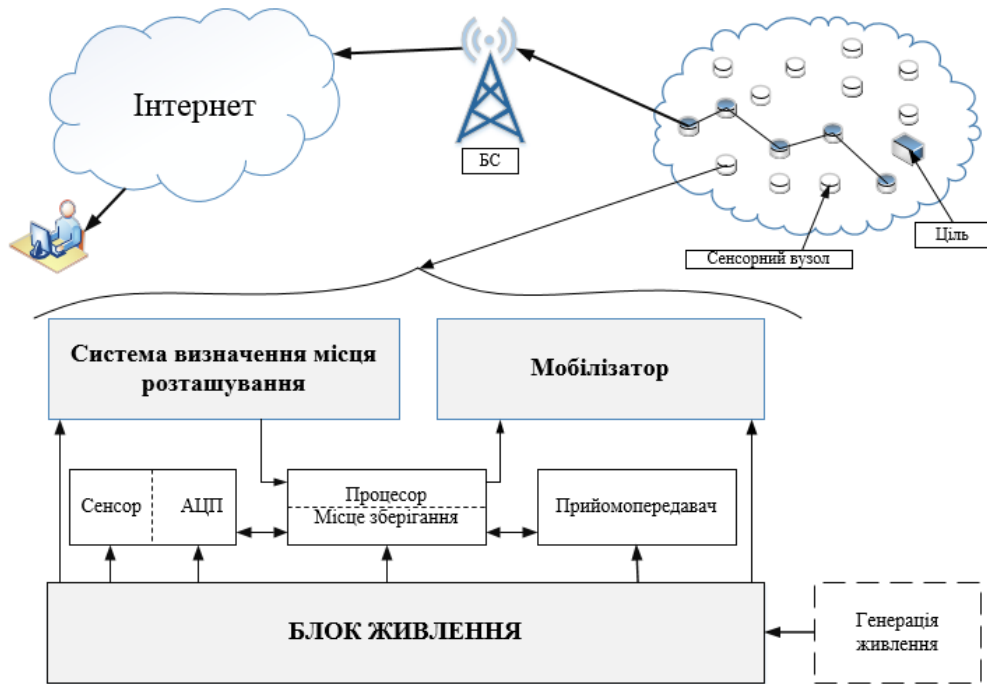


Рис. 1.2 Компоненти сенсора

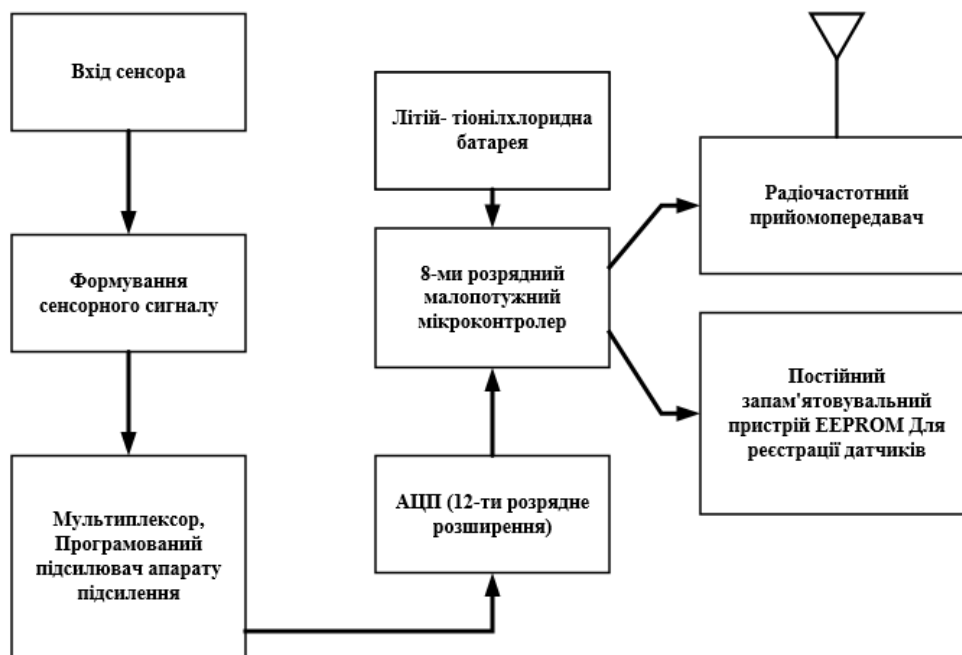


Рис. 1.3 Функціональна блок-схема сенсора

1.4 Протоколи і алгоритми безпроводової сенсорної мережі

У БСМ основним завданням сенсора є зчитування даних і відправлення їх на базову станцію в середовищі з безліччю переходів, для якої шлях маршрутизації є важливим. Для обчислення шляху маршрутизації від вихідного сенсора до базової станції існує величезна кількість пропонуваніх протоколів

маршрутизації. Конструкція протоколів маршрутизації для БСМ повинна враховувати обмеження потужності і ресурсів мережевих сенсорів, змінюється в часі якість бездротового каналу і можливість втрати і затримки пакетів. Для вирішення цих вимог до дизайну були запропоновані кілька стратегій маршрутизації для БСМ.

Перший клас протоколів маршрутизації використовує плоску мережеву архітектуру, в якій всі сенсори вважаються одноранговими. Плоска мережева архітектура має ряд переваг, включаючи мінімальні накладні витрати для підтримки інфраструктури та можливості виявлення декількох маршрутів між зв'язаними сенсорами для відмовостійкості.

Другий клас протоколів маршрутизації накладає структуру в мережі для досягнення енергоефективності, стабільності і масштабованості. В цьому класі протоколів мережеві сенсори організовані в кластери, в яких сенсор з більш високою залишковою енергією, наприклад, приймає на себе роль голови кластера. Голова кластера відповідає за координацію дій всередині кластера і передачу інформації між кластерами. Кластеризація має потенціал для зниження споживання енергії і подовження терміну експлуатації мережі.

Третій клас протоколів маршрутизації використовує підхід, орієнтований на дані, для поширення інтересу в мережі. У підході використовується накладення на основі атрибутів, в результаті чого сенсор-джерело запитує атрибут для явища, а не окремий сенсор. Поширення інтересів досягається шляхом призначення завдань сенсорів і вирази запитів щодо конкретних атрибутів. Різні стратегії можуть використовуватися для зв'язку інтересів з сенсорами, включаючи трансляцію розсилки, засновану на основі атрибутів багатоадресної розсилки, геокасту і будь-який іншого.

Четвертий клас протоколів маршрутизації використовує розташування для адресації сенсора. Маршрутизація на основі розташування корисна в програмах, де становище сенсора в межах географічного охоплення мережі має відношення

до запиту, випущеному вихідним сенсором. Такий запит може вказувати конкретну область, в якій може виникнути інтерес явище, або близькість до певної точки мережного середовища.

Деякі основні протоколи маршрутизації і алгоритми для вирішення проблеми збереження енергії [6]:

- 1) Flooding (лавинна розсилка): flooding - це поширена техніка, часто використовувана для виявлення шляху і поширення інформації в провідних і безпроводних динамічних мережах. Стратегія маршрутизації flooding проста і не залежить від дорогого обслуговування топології мережі і складних алгоритмів виявлення маршруту. Flooding використовує реактивний підхід, при якому кожен сенсор, який отримує пакет даних або управління, відправляє пакет всім своїм сусідам. Після передачі пакет слідує за всіма можливими шляхами. Якщо мережа не буде відключена, пакет в кінцевому підсумку досягне свого адресата. Крім того, у міру зміни топології мережі пакет передається за новими маршрутами. Рис.1.4 ілюструє концепцію flooding в мережі передачі даних. Як показано на малюнку, flooding в його простій формі може призвести до того, що пакети будуть тиражуватися мережевими сенсорами необмежено.

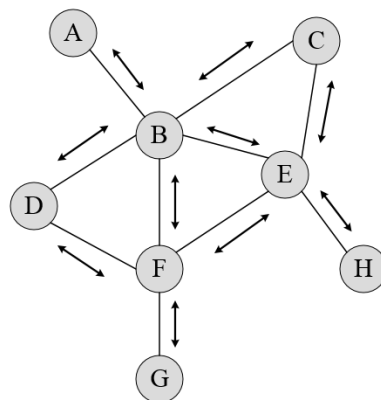


Рис. 1.4 Flooding (лавинна розсилка) в мережах передачі даних

- 2) Gossiping: gossiping («з вуст у вуста») для усунення недоліків flooding був запропонований інший підхід, званий gossiping. Подібно flooding, gossiping

використовує просте правило пересилання і не вимагає дорогого обслуговування топології або складних алгоритмів виявлення маршруту. На відміну від flooding, коли пакет даних передається всім сусідам, gossiping вимагає, щоб кожен сенсор відправляв вхідний пакет довільно обраному сусідові. Після прийому пакета сусід, обраний випадковим чином вибирає один зі своїх власних сусідів і пересилає пакет заданій сусідові. Цей процес триває до тих пір, поки пакет не досягне свого призначеного адресата, чи не буде перевищено максимальну кількість переходів.

- 3) Протоколи для інформації за допомогою переговорів (SPIN): сенсорний протокол маршрутизації через переговори (SPIN) - це сімейство протоколів поширення інформації для БСМ (орієнтоване на дані) на основі переговорів. Основна мета цих протоколів полягає в ефективному поширенні спостережень, зібраних окремими сенсорами, на всі сенсори в мережі. Прості протоколи, такі як flooding та gossiping, зазвичай пропонуються для забезпечення поширення інформації в БСМ. Для наведення потрібно, щоб кожен сенсор відправляв копію пакета даних всіх своїх сусідів, поки інформація не дійде до всіх сенсорів мережі. З іншого боку, gossiping використовують рандомізацію для зменшення кількості дубльованих пакетів і вимагають тільки того, щоб сенсор, який отримує пакет даних, пересилав його довільно обраному сусідові.

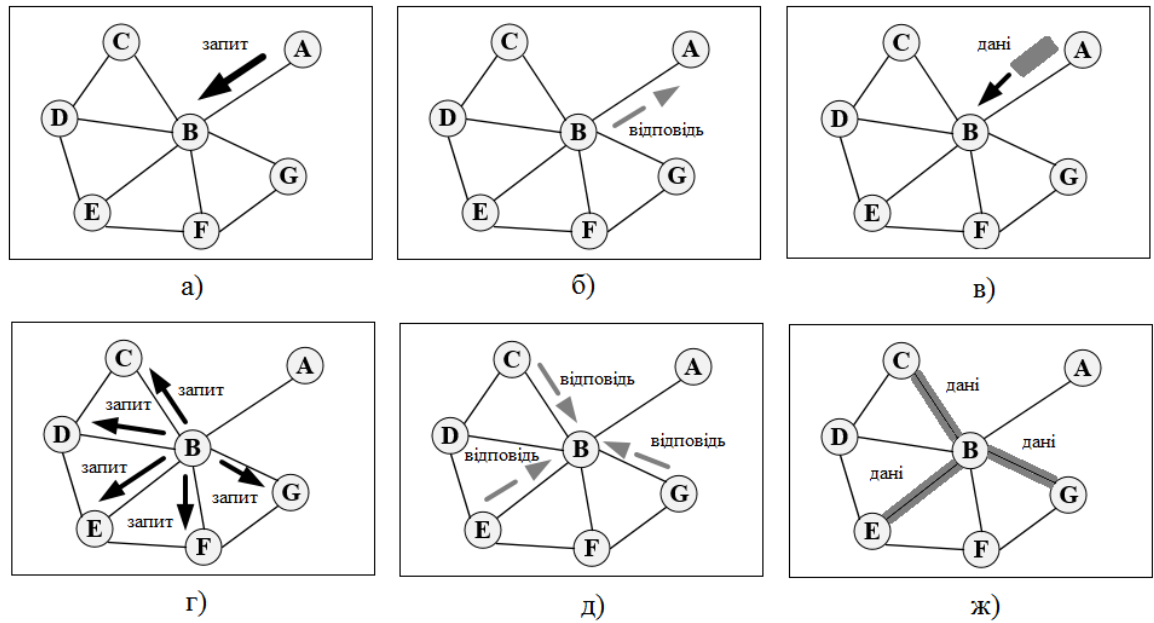


Рис. 1.5 Операція базового протоколу SPIN

4) Ієрархія адаптивної кластеризації з низьким енергоспоживанням (LEACH).

Низькоенергетична кластерна ієрархія (LEACH) - це алгоритм маршрутизації, призначений для збору і доставки даних до приймача даних, як правило, БС.

Основними завданнями LEACH є:

- Продовження терміну служби мережі
- Зниження споживання енергії кожним мережевим сенсором
- Використання агрегації даних для зменшення кількості комунікаційних повідомлень

Для досягнення цих цілей LEACH використовує ієрархічний підхід для організації мережі в набір кластерів. Кожен кластер управляється обраною головою кластера. Голова кластера бере на себе відповідальність за виконання декількох завдань. Перше завдання полягає в періодичному зборі даних від членів кластера. При зборі даних голова кластера об'єднує її в спробі видалити надлишковість серед корельованих значень. Другий основним завданням голови кластера є передача агрегованих даних безпосередньо на базову станцію по одному ходу. Третьою основною задачею голови кластера є створення графіка на основі TDMA, відповідно

до якого кожному сенсору кластера призначається часовий інтервал, який він може використовувати для передачі. Голова кластера оголошує про розклад своїм членам кластера за допомогою ширококомовної передачі. Щоб зменшити ймовірність зіткнень між сенсорами всередині і поза кластера, сенсори LEACH використовують схему множинного доступу з кодовим розділенням для зв'язку.

Основні операції LEACH організовані в дві різні фази. Перший етап, етап настройки, складається з двох етапів, вибору кластерної голови і формування кластерів. Другий етап, фаза стійкого стану, фокусується на зборі даних, агрегації і доставці на базову станцію.

На початку фази настройки починається вибір кластерної голови. Щоб вирішити, чи належний сенсор стати головою кластера чи ні, поріг $T(s)$, виглядає наступним чином:

$$T(s) = \begin{cases} \frac{p_{\text{опт}}}{1 - p_{\text{опт}} \cdot (r \cdot \text{mod} \cdot \frac{1}{p_{\text{опт}}})}, & \text{якщо } s \in G' \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де r - поточний номер раунду, а G - набір сенсорів, які не стали головами кластера протягом останніх $\frac{1}{p_{\text{опт}}}$ раундів. На початку кожного раунду кожен сенсор, що належить множині G , вибирає випадкове число 0 або 1. Якщо випадкове число менше порога $T(s)$, то сенсор стає головою кластера в поточному раунді.

- 5) Ефективні протоколи, чутливі до порогових значень (TEEN і APTEEN) [10, 11]. Два ієрархічних протоколи маршрутизації, які називаються TEEN (протокол чутливості з урахуванням граничного значення енергоефективності, мережевий протокол) і APTEEN (адаптивний періодичний пороговий чутливий енергоефективний сенсорний мережевий протокол).

Ці протоколи були запропоновані для програм з критичним часом. У TEEN сенсори постійно сприймають середу, але передача даних виконується рідше. Сенсор кластерної голови посилає своїм членам жорсткий поріг, який є граничним значенням сприйманого атрибута і м'яким порогом, що є невеликою зміною значення чутливого атрибута, який запускає сенсор для включення його передавача і передачі. Таким чином, жорсткий поріг намагається зменшити кількість передач, дозволяючи сенсорам передавати тільки тоді, коли чутливий атрибут знаходиться в діапазоні інтересів. М'який поріг ще більше зменшує кількість передач, які могли б статися в іншому випадку, коли незначна зміна або відсутність зміни атрибута. Менше значення м'якого порога дає більш точну картину мережі за рахунок збільшення споживання енергії. Таким чином, користувач може контролювати компроміс між ефективністю використання енергії та точністю даних. Коли кластерні голови повинні змінюватися, нові значення для вищевказаних параметрів передаються в ефір. Основний недолік цієї схеми полягає в тому, що якщо порогові значення не приймаються, сенсори ніколи не будуть зв'язуватися, і користувач взагалі не отримає ніяких даних з мережі.

- б) Енергоефективне збирання у сенсорних інформаційних системах (PEGASIS). Енергоефективний збір у сенсорних інформаційних системах (PEGASIS) і його розширення, ієрархічний PEGASIS, є сімейством протоколів маршрутизації і збору інформації для безпроводових сенсорних мереж. Основні цілі PEGASIS - двоякі. По-перше, протокол націлений на продовження терміну служби мережі за рахунок досягнення високого рівня енергоефективності та рівномірного споживання енергії у всіх мережевих сенсорах. По-друге, протокол прагне зменшити затримку, яку дані піддаються на її шляху до приймача.

Модель мережі, розглянута PEGASIS, передбачає однорідний набір сенсорів, розгорнутих в географічній області. Передбачається, що сенсори мають глобальні знання про позиції інших сенсорів. Крім того, вони мають

здатність контролювати свою здатність охоплювати довільні діапазони. Сенсори також можуть бути оснащені радіо-прийомопередавачами з підтримкою CDMA. Відповідальність сенсорів полягає в зборі та доставці даних на приймач, зазвичай в безпроводову базову станцію. Метою є розробка структури маршрутизації і схеми агрегації для зниження споживання енергії і доставки агрегованих даних на базову станцію з мінімальною затримкою при балансуванні споживання енергії між сенсорами. На відміну від інших протоколів, які покладаються на деревоподібну структуру або кластерну ієрархічну організацію мережі для збору і поширення даних, PEGASIS використовує ланцюгову структуру.

7) Спрямована дифузія.

Спрямована дифузія - це протокол маршрутизації, орієнтований на дані, для збору і поширення інформації в БСМ. Основною метою протоколу є досягнення значної економії енергії для продовження терміну служби мережі. Для досягнення цієї мети спрямована дифузія зберігає взаємодію між сенсорами в термінах обміну повідомленнями, локалізованих в межах обмеженою мережі. Використовуючи локалізовану взаємодію, пряма дифузія може як і раніше забезпечувати надійну багатоколійну доставку і адаптуватися до мінімальних підмножин мережевих шляхів. Ця унікальна особливість протоколу в поєднанні з здатністю сенсорів узагальнювати відповідь на запити призводить до значної економії енергії.

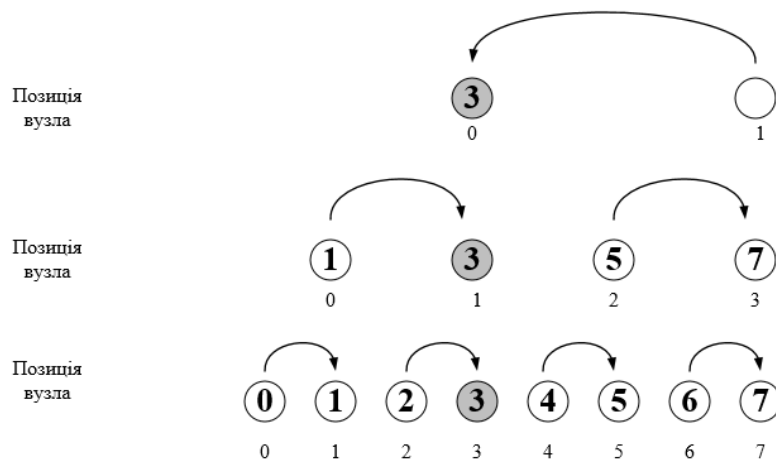


Рис. 1.6 Схема збору та об'єднання даних на основі ланцюгів

До основних елементів прямої дифузії відносяться інтереси, повідомлення даних, градієнти і підкріплення. Спрямована дифузія використовує інформаційну модель публікації і підписки, в якій запитувач висловлює інтерес, використовуючи пари атрибут-значення. Інтерес може розглядатися як запит або опитування, який вказує, чого хоче запитувач.

- 8) Географічна адаптивна достовірність (ГАД). Географічна адаптивна достовірність - це алгоритм маршрутизації, заснований на енергоспоживанні, розроблений, в основному, для мобільних динамічних мереж, але також можна застосовувати до сенсорних мереж. Область мережі спочатку ділиться на фіксовані зони і формує віртуальну сітку. У середині кожної зони сенсори взаємодіють один з одним, щоб грати різні ролі. Наприклад, сенсори обирають один сенсор, щоб він не перебував у сплячому режимі протягом певного періоду часу, а вони знаходяться в сплячому режимі. Цей сенсор відповідає за моніторинг і передачу даних в БС від імені сенсорів в зоні. Отже, географічна адаптивна достовірність зберігає енергію, відключаючи непотрібні сенсори в мережі, не впливаючи на рівень точності маршрутизації.

1.5 Огляд літаючих сенсорних мереж

Зважаючи на збільшення кількості сенсорних вузлів USN, що застосовуються для моніторингу за об'єктами, розподіленими на великій площі, такими як виноградники, сейсмічно небезпечні об'єкти, прикордонна смуга та ін. Тому можливо виділити ці мережі в окремий клас від інших систем, мереж що самоорганізуються - з'явився термін сенсорні поля. Як правило, сенсорні поля розташовуються у віддалених районах, в яких відсутні канали зв'язку з мережею зв'язку загального користування для передачі даних, і припускають автономне електроживлення сенсорних вузлів. У разі, якщо такі канали реалізовані (супутниковий зв'язок, GPRS / 3G, 4G, LTE і ін.), То витрати енергії, що

необхідна для передачі даних, призведуть до зменшення життєвого циклу сенсорного вузла.

Паралельно з розвитком USN спостерігається збільшення масштабів використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за рахунок використання їх для вирішення різних завдань: фото / відео зйомки, доставки вантажів, збору даних з віддалених об'єктів і ін. Потужний сплеск інтересу до безпілотної авіації в економічно розвинених країнах світу стався в 80-90-ті роки ХХ століття. Можна навіть говорити про своєрідну «моду на безпілотники». Моделі БПЛА були розроблені і прийняті на озброєння в Ізраїлі, США, Італії, Франції та цілій низці інших держав.

В останні роки з'явився новий вид самоорганізованих мереж - літаючі цільові мережі FANET (Flying Ad Hoc Networks) [8].

1) Літаючі цільові мережі FANET

Одним з родоначальників даних мереж була компанія Boeing. Інженери компанії порахували, що щохвилини в повітрі знаходиться близько 2000 літаків Boeing і ще 1200 роблять вліт / посадку. На літаках було встановлено спеціальне обладнання, що дозволило створити літаючу самоорганізується мережу, яка в даний час розглядається як резервний транспортний сегмент мережі Інтернет [6].

В роботі цільових мереж FANET використовуються алгоритми самоорганізації. Даний підхід використовується як для невеликих загальнодоступних БПЛА, так і для БПЛА спеціального призначення, які запускаються з метою організації літаючої мережі над районом з надзвичайною ситуацією для взаємодії екстрених служб. Одним з ключових завдань є взаємодія таких мереж з мережею зв'язку загального користування, центром моніторингу та мобільними користувачами (рис. 1.7). З огляду на потребу в зборі даних з віддалених сенсорних полів і можливість застосування для цих цілей безпілотних літальних апаратів сформувало новий додаток Інтернету Речей - літаючі сенсорні мережі FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Networks) [9].

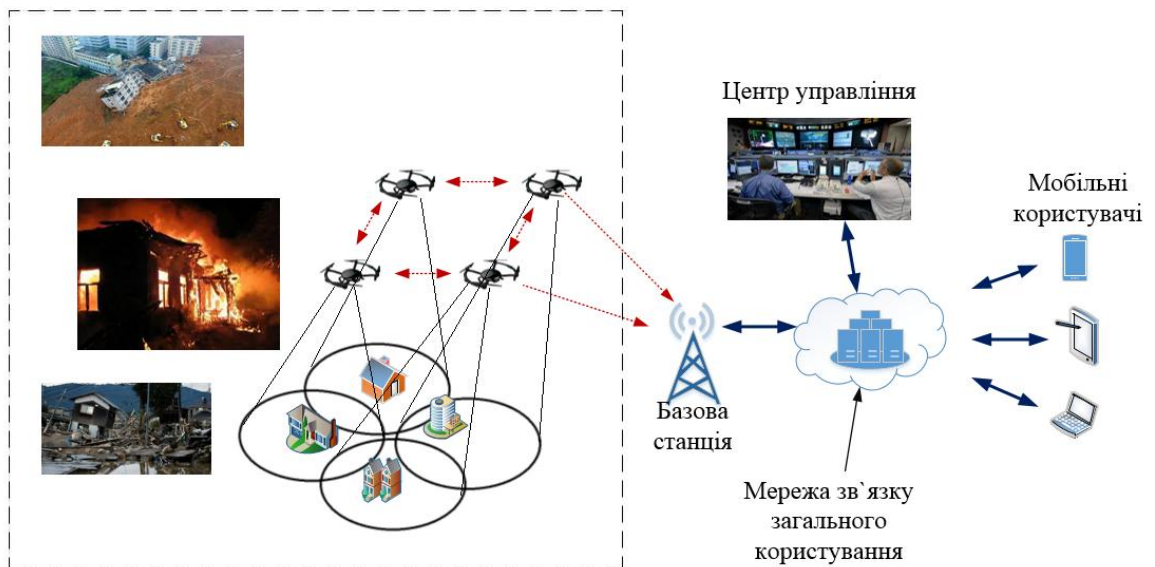


Рис. 1.7 Приклад організації мережі FANET

2) Літаючі сенсорні мережі FUSN

Ці літаючі сенсорні мережі, на відміну від FANET, припускають наявність двох сегментів: наземного і літаючого, які взаємодіють між собою (рис. 2).

Наземний сегмент, як правило, являє собою розподілену мережу самоорганізованих сенсорних вузлів USN. Варто відзначити, що до моменту появи мереж FANET і FUSN були проведені численні дослідження за цільовими мереж для транспортних засобів VANET і мобільним цільовим мереж MANET. Основна відмінність цих мереж від класичних USN - це швидкість переміщення і щільність сенсорних вузлів відповідно. Отже, і механізми побудови, маршрутизації, кластеризації та ін., Характерні для цих мереж, утворюють нові характеристики для літаючих сенсорних мереж, які вимагають додаткового опрацювання.

Літаючий сегмент базується на основних принципах, що відносяться до мереж FANET з однією відмінністю: для доставки інформації можуть використовуватися принципи, характерні для мереж DTN (delay-tolerant networks). Основне завдання DTN - це доставка даних від відправника до одержувача навіть після обриву (переривання зв'язку) зв'язку. З огляду на те, що

даний підхід успішно реалізований в мережах MANET - доцільно його застосування і для літаючих сенсорних мереж.

Обмін інформацією БПЛА зі шлюзом ССОП відбувається в той момент, коли перший входить зону видимості шлюзу. Такий зв'язок здійснюється за рахунок стабільного радіоканалу з дальністю дії 100-200 м.

На більшій відстані мобільний об'єкт може передавати інформацію через підключення до ССОП через канал GPRS / 3G / 4G. Передача інформації по такому каналу може бути перервана через збої в зв'язку при використанні його в повітрі і на значній відстані від вишок GSM [10].

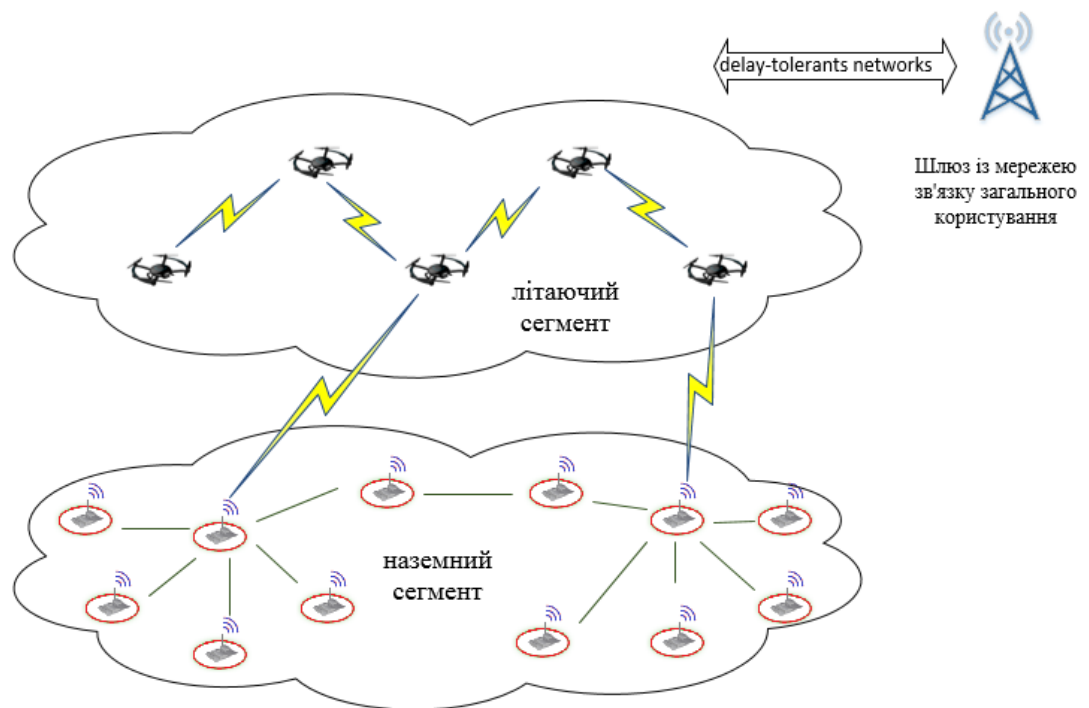


Рис. 1.8 Приклад організації мережі FUSN

Висновки до розділу

Розглянуто сучасні безпроводові технології. Наведено приклади застосування безпроводних сенсорних мереж та важливість їх розвитку та вдосконалення.

Новітні технології безпроводового зв'язку і прогрес в області виробництва мікросхем дозволили протягом останніх кількох років перейти до практичної розробки та впровадження нового класу розподілених комунікаційних систем - сенсорних мереж.

БСМ складаються з мініатюрних обчислювально-комунікаційних пристроїв - мотів (від англ. Motes - пилінки), або сенсорів. Сенсор являє собою плату розміром звичайно не більше одного кубічного дюйма. На платі розміщуються процесор, пам'ять - флеш і оперативна, цифроаналогові і аналого-цифрові перетворювачі, радіочастотний приймач, джерело живлення і сенсори.

Було детально розглянуто особливості безпроводових сенсорних мереж їхнє застосування і проблеми при проектуванні таких мереж. Сенсори – це пристрої, які складаються з наступних підсистем: прийняття, обробки даних, моніторингу, комунікаційної та джерела живлення. Сенсори є автономними пристроями, електроживлення яких може здійснюватися на об'єктах моніторингу, пультах сигналізації, або ж від батареї, що є найбільш

раціональною в критичних ситуаціях. Передача даних здійснюється шляхом перенаправлення інформації до найближчого сенсора, а не на базову станцію або точку доступу як в традиційних мережах з фіксованою інфраструктурою. Такі мережі називаються багатокроковими.

Таким чином, для вирішення завдань збору даних з сенсорних полів з використанням БПЛА і доставки даних до шлюзу з мережею зв'язку загального користування доцільно використовувати загальнодоступні квадрокоптери з можливістю програмування алгоритмів обльоту, інсталяції сенсорних вузлів на заданій території і оптимізації збору даних.

За аналогією з терміном «Мережа зв'язку загального користування» такі апарати в подальшому доцільно називати безпілотні літальні апарати загального користування - БПЛА. Використання БПЛА дозволить вирішити цілий ряд завдань, пов'язаних з доставкою даних з віддалених об'єктів моніторингу з заданим рівнем затримки.

Таким чином, було розглянуто новий вид самоорганізованих мереж - літаючі цільові мережі FANET та FUSN.

Розглянули структуру БСМ, яка включає в себе різні топології для радіозв'язку:

- Зірка (точка - багатоточка)
- Чарункова мережа (точка-точка)
- Гібридна (зірка – чарункова мережа)

Наведено деякі протоколи і алгоритми які використовуються у БСМ:

1. Flooding (лавинна розсилка)
2. Gossiping («з вуст у вуста»)
3. SPIN - сенсорний протокол маршрутизації через переговори
4. LEACH - Низькоенергетична кластерна ієрархія
5. TEEN і ARTEEN - Ефективні протоколи, чутливі до пороговим значенням

6. PEGASIS - Енергоефективне збирання у сенсорних інформаційних системах
7. Спрямована дифузія
8. ГАД - географічна адаптивна достовірність

2. АНАЛІЗ РАДІОМЕРЕЖ З САМООРГАНІЗАЦІЄЮ

2.1 Основні особливості мереж, що самоорганізуються

У сучасних телекомунікації величезна роль належить мережам, які самоорганізуються. Радіомережі з самоорганізацією (self-organizing) (MCP) припускають можливість створення (організації) бездротової мережі без участі людини або з його мінімальною участю. Дана архітектура мережі отримала назву ad-hoc (по-латині) або for this purpose (по-англійськи) - мережі, створювані за певним призначенням [11 – 13].

Виділимо характерні особливості архітектури даних мереж (на відміну від мереж загального користування):

1. Змінювана кількість вузлів (розмірність мережі) і площа покриття. Кількість вузлів мережі може змінюватися залежно від умови її функціонування і може варіюватися від десятків до десятків тисяч (мільйонів) вузлів. Залежно від кількості вузлів і потужності їх передавачів може змінюватися географічний простір покриття мережі.

2. Мобільність і/або стаціонарність вузлів. Так звані мобільні радіомережі, що самоорганізуються або MANET (Mobile Ad Hoc Networks) припускають

можливість переміщення будь-якого вузла мережі. Стационарні МСР припускають незмінність місця розташування вузлів. Також можлива побудова гібридних ad-hoc мереж, які передбачають наявність у мережі як мобільних, так і стаціонарних вузлів.

3. Випадковість топології мережі, її неоднорідність і динамічність зміни. Елементи мережі можуть бути мобільними, містити або не містити базових станцій і фіксованих маршрутів передачі інформації, кожен вузол може бути оснащений акумуляторними батареями різної ємності, змінювати рівень потужності передачі (діаграму спрямованості антени) і тим самим встановлювати різну зв'язність в мережі (топологію мережі). У цілому топологія визначає потенційні можливості мережі (параметри її функціонування). Кожен вузол може переміщатися в довільному (певному) напрямку, що призводить до частих і непередбачуваних змін маршрутів, а також до поділу мережі на окремі незв'язні підмережі і втрати пакетів.

4. Принцип організації передачі інформації - комутація повідомлень (пакетів) з використанням багатострибкової маршрутизації – кожен вузол виступає в якості ретранслятора (точніше маршрутизатора) повідомлень (пакетів). Для передачі відправником пакетів адресатові кожному вузлу необхідно будувати, зберігати і підтримувати маршрути передачі, що складаються з певної послідовності вузлів ретрансляторів (стрибків).

5. Тип управління – децентралізований, який передбачає автономність вузлів у роботі, тобто відсутність будь-якої фіксованої інфраструктури, виділеної мережі передачі службової інформації та централізованого управління (на відміну від існуючих систем управління телекомунікаційними мережами [4, 5]).

Для мереж великої розмірності (з метою зменшення обсягу службового трафіку) проводиться розбиття мережі на кластери з введенням головних вузлів

кластерів і передачі їм функція управління кластером (вводиться ієрархічне управління).

6. Ненадійність і динамічність радіоресурсу, колективний характер його використання призводить до змінюваної продуктивності каналів і вузлів. Кожен вузол може бути обладнаний одним або кількома радіоінтерфейсом з різними параметрами прийомопередавачів (багатоканальні мережі), що працюють в різних піддіапазонах. Неоднорідність радіозасобів за рівнем потужності передачі призводить до появи асиметричних каналів.

7. Масштабованість – мережа легко нарощується і змінює кількість своїх вузлів. Збільшення розмірності мережі до сотень і тисяч вузлів припускає введення ієрархії управління, тобто її поділ на кластери з виділенням головних, простих вузлів і шлюзів. Введення ієрархії управління передбачає вирішення проблем маршрутизації і адресації, а також завдання підтримки зон ієрархії при зміні топології мережі.

8. Обмеженість ресурсів вузлів мережі. Вузол мережі має обмежені ресурси (ємність пам'яті, продуктивність процесора, потужність передавача і енергоємність батарей). У свою чергу енергія батарей витрачається як на комунікаційну (прийом, передача, обробка повідомлень тощо), так і на обчислювальну (процесор) складові.

9. Обмежена безпека визначається обмеженою фізичною безпекою радіоканалу. Широкомовна природа радіоканалу дозволяє зловмисникові (противнику) ставити активні і пасивні перешкоди, здійснювати прослуховування передач вузлів, аналізувати мережевий трафік і розкривати існуючу систему управління мережею. Динамічна топологія і колективна робота вузлів припускають вразливість функціонування протоколів канального, мережевого і інших рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Зростаючий комерційний інтерес до бездротових мереж в 90-х роках призвів до появи ряду стандартів і технологій фізичного і канального рівнів для переносних

комп'ютерів: IEEE 802.11 різних версій, Bluetooth, HiperLan [14] та ін. Проте дані стандарти і протоколи не враховують особливостей побудови і функціонування МСР.

2.2 Класифікація радіомереж з самоорганізацією

Розвиток елементної бази та зрослі обчислювальні можливості на сьогоднішній день визначили різноманіття сфер застосування МСР (рис. 2.1): мережі ad-hoc – мережі з випадковими, але стаціонарними абонентами; мобільні радіомережі (мережі MANET) – мережі мобільних абонентів, реалізують повністю децентралізоване управління (відсутність базових станцій); комірчасті мережі (MESH) - мережі комірчастої (зонової) структури, які з бездротових стаціонарних маршрутизаторів (створюють бездротову магістраль і зону обслуговування абонентів) і мобільних / стаціонарних абонентів, що мають доступ (в межах зони радіозв'язку) до одного з маршрутизаторів; сенсорні мережі (Sensors networks) – складаються з малогабаритних сенсорних вузлів з інтегрованими функціями моніторингу певних параметрів навколишнього середовища, обробки і передачі даних по радіоканалах;

автомобільні мережі (мережі VANET) – мережі транспортних засобів; гібридні мережі припускають наявність спільне функціонування перерахованих вище мереж.

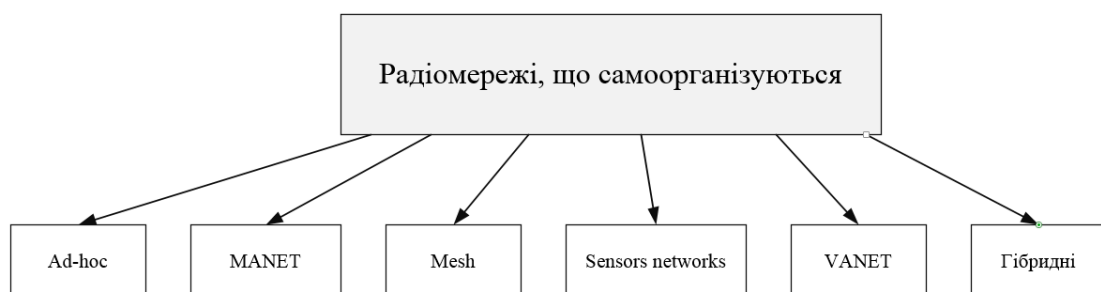


Рис.2.1 Узагальнена класифікація МСР

На рис. 2.2 представлена класифікація радіомереж з самоорганізацією по:

1) способу побудови системи управління мережею – однорівневі (flat) і ієрархічні;

2) мобільності вузлів мережі – стаціонарні, мобільні і гібридні;

3) способу поділу радіоресурсу – з детермінованим, випадковим або гібридним способом поділу радіоресурсу;

4) способу синхронізації – синхронні і асинхронні;

5) ширині смуги пропускання радіоканалу – вузькосмугові, широкосмугові і надширокосмугові (UWB);

6) складу обладнання вузлів: одноканальні і багатоканальні (один вузол містить кілька приємопередатчиків); однорідні і неоднорідні (радіотермінали з різною потужністю і продуктивністю процесора, об'ємом пам'яті, ємністю батареї тощо); мають або не мають систему позиціонування (наприклад, GPS); мають всеспрямовані антени або антени з наведеною діаграмою спрямованості (MIMO);

7) площі покриття: персональні (Personal, PAN) – до 10 м, локальні (Local, LAN) – до 500 м, міські (Metropolitan, MAN) – до 20-50 км, широкомасштабні (Wide, WAN) – більше 50 км;

8) призначенню: військові (поле бою), домашні, офісні, аварійні та ін (більше подрібно в табл. 2.1).



Рис. 2.2 Класифікація радіомереж з самоорганізацією.

Таким чином, мобільні й бездротові технології сьогодні забезпечують практично глобальне покриття для передачі даних. На їх основі розвиваються нові види технологій, послуг та програм для мобільних і стаціонарних абонентів для спілкування людей між собою, для розвитку бізнесу, для взаємодії з пристроями і машинами. Надалі відомі сьогодні системи мобільного і бездротового зв'язку будуть орієнтовані на створення користувацьких центрів. Бачення майбутніх систем базується на інтеграції та об'єднанні різних систем доступу для створення єдиної середовища спілкування на основі мереж зв'язку з комутацією пакетів. Головною тенденцією для користувача стає отримання послуг мультимедіа і різного контенту «скрізь і в будь-який час» через різні пристрої та системи доступу.

Однак, незважаючи на значний час існування МСР і сьогодні залишається невирішеним значна кількість проблем створення та експлуатації.

Можливі сфери застосування радіомереж, що самоорганізуються радіомереж описані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Можливі сфери застосування радіомереж, що самоорганізуються

Сфера	Призначення
-------	-------------

Тактичні мережі	Мережі військового призначення
Сенсорні мережі	Домашнього, промислового та військового застосування, призначені для моніторингу навколишнього середовища: переміщення тварин; хімічний, біологічний аналіз рослин; динаміка погодних умов
Аварійні мережі	Пошукові та рятувальні операції. Заміна фіксованих мереж у разі стихійних лих (землетрус, ураган і т.д.)
Комерційні мережі	Електронна комерція, бізнес: динамічний доступ користувача до бази, мобільний офіс. Сервіс при переміщенні на транспортному засобі.
Домашні мережі та мережі підприємства	Бездротові домашні мережі для різних програм Персональні мережі
Мережі навчання	Віртуальні класи, проведення конференцій
Розважальні мережі	Ігри з багатьма гравцями, домашні роботи, зовнішній доступ до Інтернету
Позиційний сервіс	Інформаційні послуги: автоматична переадресація виклику, координати заправної станції та ін

2.3 Основні проблеми радіомереж, що самоорганізуються

Серед основних проблем радіомереж з самоорганізацією можна виділити:

1. Проблема ефективного використання радіоресурсу і підвищення швидкості передачі інформації в даних мережах на фізичному рівні ЕМВВС. Одне з сучасних напрямків вирішення – використання надширокосмугових сигналів.

2. Проблема "справедливого" розподілу і колективного використання радіоресурсу на каналному рівні ЕМВВС.

3. Проблема ефективної маршрутизації в умовах динаміки топології мережі (мережевий рівень EMBVC) і різних вимогах з обслуговування певних типів трафіку.

4. Проблема створення ефективних методів (алгоритмів) управління на різних рівнях EMBVC стосовно конкретної MCR. Поява нових технологій (спрямованих антен, систем позиціонування, понадширокопосмугових сигналів і ін.), різні сфери застосування MCR вимагають створення нових методів управління даними мережами, у тому числі використання методів штучного інтелекту.

5. Проблема ефективного використання ресурсів вузлів (більшість вузлів MCR може бути портативним і відповідно обмежені у своїх ресурсах: по продуктивності процесора, ємності пам'яті та енергоємності батарей та ін.)

6. Проблема забезпечення заданої якості обслуговування для різних типів трафіку. Характеристики радіоканалів і топологія мережі схильні швидких змін. Рішення даної проблеми вимагає інтелектуалізації та інтеграції рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

7. Проблема масштабованості та організації мереж великої розмірності.

У провідних мережах обсяг службового трафіку пропорційний кількості вузлів і каналів мережі. У MCR вузли мобільні, дуже часто застосовується хвильова розсилка пакетів – тому значний обсяг службового трафіку. Інтенсивність службового трафіку зростає квадратично N^2v , де N – множина вузлів мережі та v – інтенсивність топологічних змін.

8. Проблема забезпечення безпеки в умовах децентралізованого управління та широкомовної природи радіоканалу.

Традиційні радіотехнічні системи (технології зв'язку – GSM, UMTS та ін., технології передачі даних – WLAN, WAN, та ін., радіолокація тощо) для передачі інформації використовують гармонійні або синусоїдальні коливання в якості

несучого коливання. При цьому саме частотна селекція є основним способом поділу цих каналів. При цьому, більшість традиційних радіотехнічних систем є вузькосмуговими – тобто працюють в смузі частот, багато меншою, ніж їх несуча частота.

Але саме ширина смуги частот і визначає кількість інформації, що передається в одиницю часу. Для підвищення інформаційної можливості системи існує єдина можливість – збільшення смуги пропускання частот.

Однак, шлях простого розширення смуги частот сьогодні вже не реальний, враховуючи «тісноту» радіоспектра. Ділянок, не зайнятих комерційним використанням, супутниковим зв'язком, військовими, державної спецзв'язком і т.п. практично не залишається.

Додамо сюди ще й «букет» проблем, властивих традиційним радіотехнічним системам: інтерференція і багаторазове відбиття від перешкод, низька проникаюча здатність сигналу, завадостійкість та інформаційна незахищеність каналів передачі інформації. Зрештою, існують прості фізичні обмеження на «щільність користувачів».

Однак, стрімке збільшення інформаційних потоків у сучасному світі, не може загальмуватися через невирішені проблеми традиційних технологій передачі інформації. Саме тому, інформативність (або пропускна здатність) системи передачі інформації є одним з ключових пунктів у сприйнятті ринком тієї чи іншої технології.

Вирішити проблеми вузькосмугових радіотехнічних систем можна за допомогою технології, що використовує надширокосмугові (Сніп), в англійській аббревіатурі – UWB (Ultra Wideband), сигнали.

2.4 Переваги та перспективи мереж з самоорганізацією

Основні відмінності в принципах побудови і функціонування стільникових мереж і мереж, що самоорганізуються видно з рис. 2.3 і 2.4

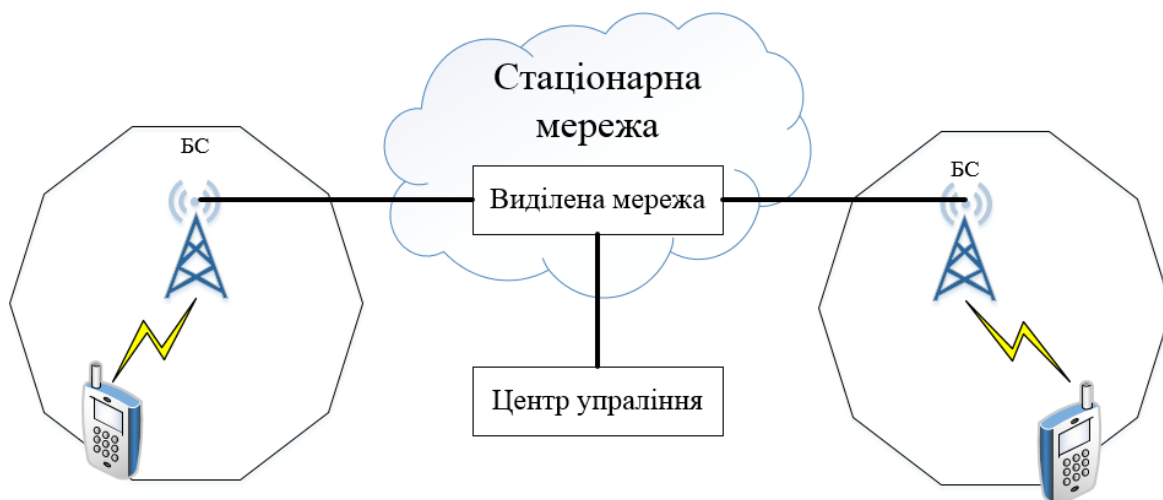


Рис. 2.3 Стільникові мережі

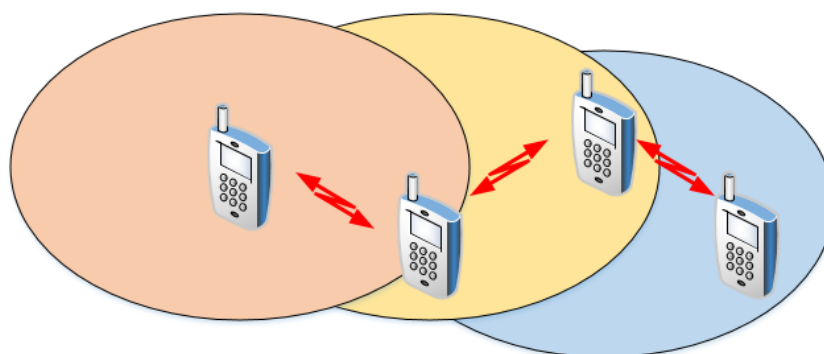


Рис. 2.4 Радіомережі, що самоорганізуються

Порівняльний аналіз варіантів побудови мереж показує ряд переваг радіомереж, що самоорганізуються в порівнянні з стільниковими і транкінговими мережами (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Порівняльний аналіз варіантів побудови мереж.

Характеристика	Стільникові мережі	Транкінгові мережі	Радіомережі з самоорганізацією
Архітектура	Фіксована стільникова: фіксовані зони обслуговування, стаціонарні базові станції		Відсутність фіксованої інфраструктури, кожен вузол є ретранслятором

	Використання стаціонарної мережі загального користування	Використання фіксованою мережі для з'єднання базових станцій	(маршрутизатором) повідомлень
Тип топології	Статична (базові станції статичні)		Випадкова, високо динамічна, адаптація топології до умов функціонування
Час розгортання	Дуже великий Необхідний етап проектування (планування) мережі	Значний Необхідний етап планування мережі	Швидке розгортання, самоорганізація мережі, легке нарощування
Тип управління	Централізований, наявність окремої (виділеної) мережі управління		Децентралізований, відсутність виділеної мережі управління
Мобільність	Мобільні тільки абоненти в межах зон покриття стаціонарними базовими станціями		Мобільні всі елементи мережі
Живучість	Дуже низька		Дуже висока
Швидкість передачі	Мала –(десятки-сотня Кб/с)		Висока, 1–150 Мбіт/с

Щоб зрозуміти місце МСР в ряду інших технологій, розглянемо технології бездротового зв'язку, включаючи сучасні системи стільникового зв'язку, які в значній мірі спираються на мережеву інфраструктуру: покриття забезпечується базовими станціями, управління ресурсами радіопередачі здійснюється централізовано і послуги інтегровані в систему.

Можливості сучасних бездротових технологій та їх основні параметри наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Можливості сучасних бездротових технологій та їх основні параметри.

Технологія	Теоретична швидкість	Частоти	Дальність	Потужність передавачика
IEEE 802.11b	1, 2, 5,5, 11 Мбіт/с	2,4 ГГц	25–100 м (всередині приміщень); 100–500 м	~30 мВт
IEEE 802.11g	54 Мбіт/с	2,4 ГГц	25–50 м (всередині приміщень)	~79 мВт
IEEE 802.11n	150 Мбіт/с	2,4-2,5, 5 ГГц	25-70 м (всередині приміщень)	до 1 Вт
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	1-24 Мбіт/с (v1.1-v3.0)	2,4 ГГц	10 м (максимально 100 м)	1 мВт (максимально 100 мВ)
UWB (IEEE 802.15.3)	110–675 Мбіт/с	3–24 ГГц	~10 м	100 мВт, 250 мВт,
HiperLAN2	мах 54 Мбіт/с	5 ГГц	30-150 м	200 мВт или 1 Вт
IrDA	мах 4 Мбіт/с	Інфрачервоний (850 нм)	~10 м (пряма видимість)	Залежить від відстані
HomeRF	1 Мбіт/с (v1.0), 10 Мбіт/с (v2.0)	2.4 ГГц	~50 м	100 мВт
IEEE 802.16 IEEE 802.16a IEEE 802.16e	134 Мбіт/с, 75 Мбіт/с >15 Мбіт/с до 365 мбіт/с	10-66 ГГц < 11 ГГц < 6 ГГц До 66ГГц (2x20 MHz FDD)	2–5 км 7–10 км 2–5 км до 10 км	Керування потужністю

IEEE 802.16m (2x2 MIMO)				
---	--	--	--	--

Подальший розвиток бездротових технологій передбачає введення мережі MANET як складової мереж зв'язку четвертого покоління 4G – так звані стільникові мережі, що самоорганізуються (гібридні) мережі (рис.2.5).

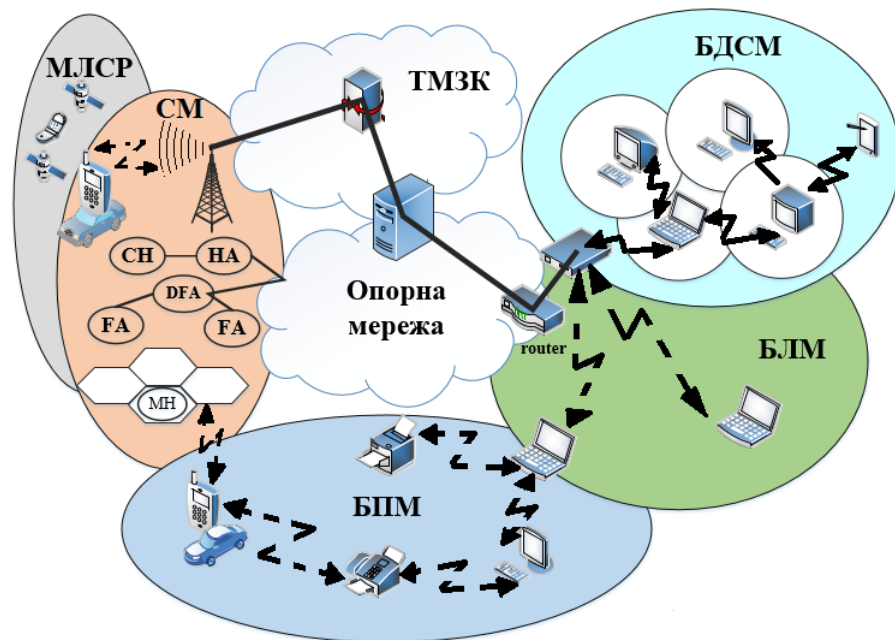


Рис. 1.5. 4G мережі

Висновки до розділу

Одним з перспективних напрямків розвитку четвертого покоління мереж зв'язку є створення та розвиток самоорганізованих радіомереж.

Дані мережі застосовуються в якості:

1) мереж радіозв'язку військового призначення (в основному тактичного рівня);

2) мереж, створювані в умовах природних катаклізмів, а також при виході з ладу мереж загального користування;

3) мереж аварійних і муніципальних служб;

4) мереж телеметрії (сенсорні мережі), призначені для моніторингу та передачі параметрів навколишнього середовища (військового, промислового, аграрного, природного та домашнього застосування);

5) мереж, створюваних при проведенні конференцій, змагань, олімпіад тощо;

6) мереж навчання і ігрові мережі;

7) автомобільних мереж;

8) комерційних мереж та ін.

До основних параметрів МСР можна віднести: кількість і мобільність вузлів мережі, розміри мережі (географічної території) та щільність розміщення вузлів; зв'язність; мережеву топологію, тип трафіку і особливості зовнішнього середовища.

Радіомережі, що самоорганізуються характеризуються:

- динамічною топологією (вузли мережі мобільні, схильні до знищення і відмов; канали радіозв'язку нестабільні, обмежені по дальності зв'язку та пропускної здатності через перешкоди, умов поширення радіохвиль тощо);

- обмеженою енергетичною можливістю вузлів, оснащених батареями;

- різною розмірністю (десятки, сотні і тисячі вузлів);

- неоднорідністю за потужністю передачі і мобільності;

- обмеженою безпекою через ширококомовній природи радіоканалу та ін.

Вузли радіомережі з самоорганізацією повинні швидко адаптуватися до частих змін топології і ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін з заданим якістю неможливо без ефективної системи управління мережею. Для оцінки ефективності функціонування мережі необхідно мати відповідні математичні моделі та методики.

3. АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛСМ НА ОСНОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

3.1 Особливості побудови та функціонування ЛСМ на основі ТА

Розглянемо приклади побудови архітектури із використанням ТА (БПЛА) (рис.3.1, 3.2).

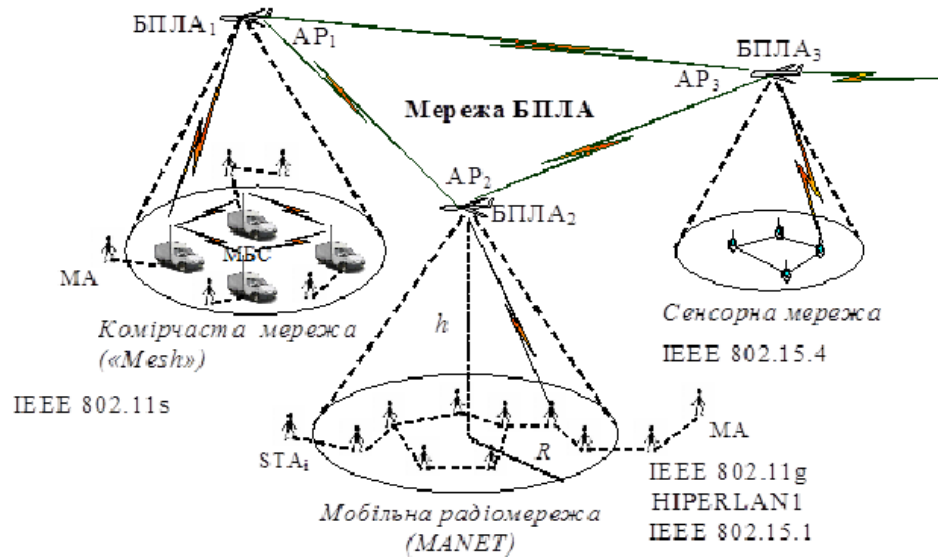


Рис.3.1. Приклад архітектури дворівневої ЛСМ на основі БПЛА

Перший (наземний) рівень складають віддалені райони наземних вузлів, роль яких можуть грати мобільні абоненти (МА), мобільні базові станції (МБС) або сенсорні пристрої в залежності від виду ЛСМ (MANET, WMN або WSN).

Другий (повітряний) складає мережі БПЛА, що виконує роль опорної мережі для забезпечення зв'язності віддалених незв'язаних районів наземних вузлів (рис.3.1) або підвищення зв'язності «проблемних» ділянок наземної мережі (наприклад, між вузлами 3 та 4, як показано на рис. 3.2).

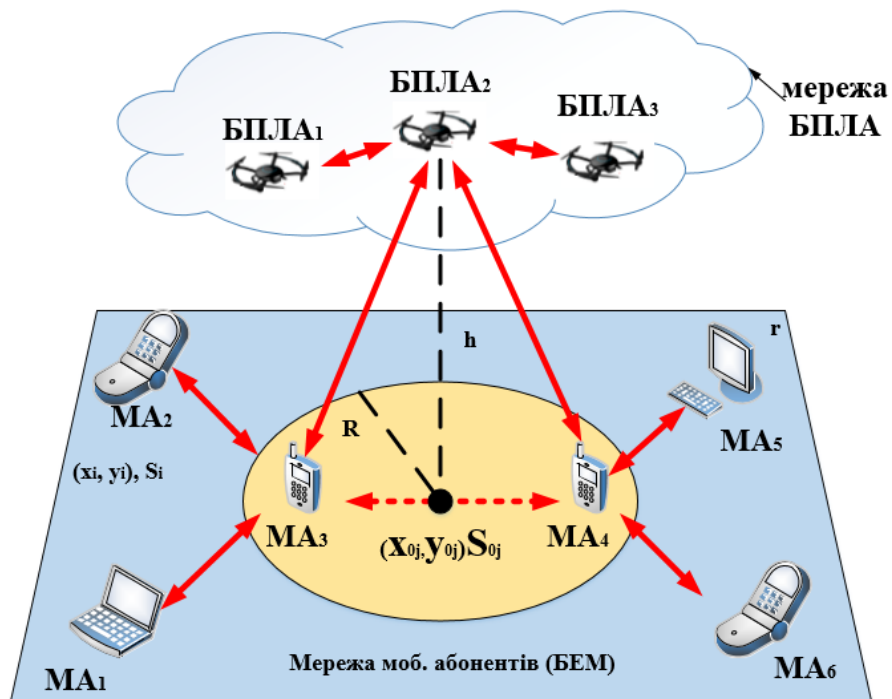


Рис.3.2 Приклад застосування БПЛА для забезпечення зв'язності ЛСМ

Кожен БПЛА-вузол ЛСМ оснащується двома комплектами прийомо-передавальної апаратури та антенних систем (для зв'язку з наземними абонентами та для зв'язку між БПЛА), мережним процесором (маршрутизатором), буферним запам'ятовуючим пристроєм, GPS-навігатором. Виділяють 4 рівні функціональних можливостей БПЛА-ретрансляторів:

- БПЛА – шлюз;
- БПЛА – маршрутизатор;
- БПЛА – міст;
- БПЛА – комутатор.

Найбільш складну структуру має БПЛА – шлюз. Він забезпечує виконання на борту широкого переліку операцій з обробки сигналів та повідомлень та може виступати в якості міжмережевого перетворювача. БПЛА – маршрутизатор та БПЛА – міст забезпечують обробку та ретрансляцію сигналів та повідомлень в межах однієї інформаційної мережі. При цьому БПЛА – маршрутизатор здійснює маршрутизацію повідомлень (пакетів), що передаються, у відповідності із

збереженим на ньому структурою мережі та користувачів. Найбільш просту структуру має БПЛА – комутатор, який виконує окремі операції обробки сигналів (підсилення, перенос в іншу область частотного спектру, корекцію крутизни фронтів). Найбільш раціональним варіантом побудови мережі, коли кожен БПЛА – вузол буде поєднувати усі вищевказані рівні функціональних можливостей.

Абонентами ЛСМ є стаціонарні та рухомі об'єкти (рис.3.1):

- Мобільні базові станції (МБС). Вони утворюють опорні мережі в різних географічних зонах (бойових дій, стихійних лих тощо), зв'язність між якими забезпечує мережа БПЛА.

- Мобільні абоненти (МА). Мобільними абонентами можуть виступати члени рятувальних бригад, особового складу військових підрозділів тощо.

- Сенсорні прилади.

Усі рухомі та стаціонарні пристрої у свою чергу мають бути оснащені:

- двома комплектами прийомопередавальної апаратури (для зв'язку між наземними абонентами та для зв'язку з БПЛА). Застосування двох окремих радіо інтерфейсів дозволяє розсилати маршрутні пакети, як через наземну мережу, так і через повітряну мережу БПЛА, та отримувати більшу кількість незалежних маршрутів між парою вузлів. Іншою перевагою застосування окремих радіо інтерфейсів є можливість використання різних частотних смуг для кожного інтерфейсу, що забезпечує кращу якість послуг (QoS) та баланс навантаження в мережі.

- мережним процесором (маршрутизатором), для здійснення ретрансляції пакетів, призначених іншим вузлам.

- буферним пристроєм (якщо вузли мережі підтримують режим енергозбереження, тобто управління потужністю випромінювання).

– засоби перетворення інформації у зручний для користувача вид (голос, дані, відео тощо), оскільки кожен наземний пристрій грає роль не тільки вузла (ретранслятора), а й кінцевого (термінального) устаткування.

3.2 Методи передачі інформації в ЛСМ з ТА

В ЛСМ на основі БПЛА можуть бути використані наступні методи передачі інформації між наземними вузлами:

1) безпосередня передача повідомлення між наземними вузлами (без застосування БПЛА).

2) безпосередня ретрансляція повідомлення одержувачу через БПЛА – у випадку, якщо і джерело інформації, і одержувач знаходяться в межах зони видимості одного БПЛА-вузла;

3) зв'язок через проміжні наземні станції ретрансляції, що називають базовими, при якій кожне повідомлення, що поступило у БПЛА-вузол, обов'язково передається на базову станцію, що визначає подальший маршрут проходження повідомлення;

4) електронна пошта (ретрансляція з перенесенням в запам'ятовуючий пристрій БПЛА). В даному випадку повідомлення приймається БПЛА-вузлом від джерела інформації, зберігається в його запам'ятовуючому пристрої, та «скидається» споживачеві під час прольоту в зоні видимості;

5) зв'язок з використанням міжстанційних каналів між БПЛА.

Найбільш перспективним є поєднання 1, 2 та 5-го методів. Воно дозволяє забезпечити глобальний зв'язок між наземними вузлами. При цьому можливі два варіанти організації каналів. У першому випадку інформація між двома наземними вузлами передається через мережу з багатократним перевипромінюванням БПЛА-вузлами по радіоканалах, що створюються тільки на час передачі інформації. У другому випадку між всіма вузлами мережі, які

"бачать" один одного, організовуються магістральні канали, що існують під час взаємної видимості, по яких, в міру необхідності, передається інформація. Кожний з цих варіантів має свої достоїнства і недоліки.

У першому випадку: простота реалізації, можливість використання одного комплексу прийомопередавальної апаратури БПЛА-вузла і для обміну з абонентами, і для обміну з сусідніми вузлами. Економне використання ресурсу каналів поєднується з ускладненням режиму входження в зв'язок і труднощами при багатократній організації множинного доступу. Такий метод достатньо ефективний при малому та середньому трафіку (вхідному навантаженню мережі) і, як буде показано нижче, неефективний при великому трафіку.

У разі великого трафіку доцільна організація магістральних каналів. При цьому різке збільшення пропускної спроможності досягається шляхом п'яти-шести кратного збільшення об'єму прийомопередавальної апаратури на борту БПЛА-вузла, що у свою чергу приводить до необхідності усунення впливу магістральних каналів один на одного, а також взаємних перешкод пакетів усередині магістральних каналів.

Особливістю функціонування ЛСМ на основі БПЛА, перш за все динаміка та змінна топологія мережі (як наземних вузлів, так і мережі БПЛА), приводять при проектуванні до ряду проблем, до яких відносяться:

- реалізація пакетної передачі інформаційних повідомлень;
- ретрансляція пакетів через проміжні вузли;
- організація множинного доступу абонентів до мережі;
- визначення маршрутів для передачі інформації по мережі;
- організація каналів по вибраному маршруту;
- управління топологією (місцеположенням) мережі БПЛА.

При пакетній передачі інформації кожне повідомлення розбивається на інформаційні пакети, що містять преамбулу та інформаційну частину. Преамбула складається з синхропосилки, що забезпечує підготовку приймального пристрою до прийому пакету (частотна, просторова і тимчасова синхронізація та автосупровід), і службової частини (у якій містяться відомості про номер пакету, адресата, маршрут проходження, види обробки та ін.). Не дивлячись на збільшення загального числа символів, що передаються, пакетний метод передачі інформації дозволяє підвищити пропускну здатність системи за рахунок одночасної організації декількох віртуальних ліній зв'язку, обслуговуючих одночасно велику кількість абонентів.

Організація користування мережею великою кількістю наземних вузлів та взаємодії БПЛА-вузлів з ними та один з одним здійснюється відповідно до правил, що називають протоколами множинного доступу (МД). Ці протоколи можна розділити на: детерміновані, випадкові та гібридні [15].

Перший клас протоколів упорядковує роботу абонентів та вузлів таким чином, що повністю усуває конфлікти, при яких два або більш абонентів (вузлів) одночасно передають повідомлення одному й тому ж вузлу. В таких протоколах розділення здійснюється шляхом статичного або динамічного закріплення частотного (FDMA), часового (TDMA), кодового (CDMA), просторового (SDMA) або гібридного (TDMA/CDMA, STDMA тощо) ресурсу каналів за абонентами і вузлами та вимагає високої організації управління мережею.

Другий клас протоколів реалізується простіше і допускає виникнення конфліктів, тобто зіткнення пакетів. Історично першим вважається метод АЛОНА. Він ефективний у випадках невеликого завантаження мережі, коли втрати частини пропускну здатності системи через зіткнення пакетів виявляються меншими за втрати, що пов'язані з простоем ресурсу. При великому трафіку виникає ефект «нерегульованого перехрестя», тобто «пробки», коли вузол не в змозі ні прийняти, ні передати пакет далі. Частково ця проблема вирішується за рахунок тактування випадкового доступу, при якому всі абоненти

і вузли починають випромінювати пакети в певний час з настанням чергового такту (S-ALOHA). Часовий інтервал між тактами покриває тривалість пакету і максимальний час його розповсюдження в просторі. Тоді при одночасному зверненні до вузла декількох абонентів буде прийнятий пакет від найближчого абонента, той, що поступив раніше з більш потужним сигналом, а решта пакетів буде відхилена.

Для зниження ймовірності зіткнення пакетів застосовуються методи доступу з контролем несучої (МДКН) або CSMA, тобто методи, що засновані на попередній перевірці стану радіоканалу. В простішому випадку перед передачею пакету вузол контролює стан каналу (наявність несучої або самої передачі). Якщо канал зайнятий, вузол відкладає передачу на більш пізній час. При звільненні каналу його передача може починатися різноманітними способами: відразу («жорсткий» МДКН), через випадковий інтервал часу («м'який»), з ймовірністю p (p -наполегливий) або з рандомізацією часу передачі на сегменти [16].

Для вирішення проблем «відкритого» та «схованого» терміналу запропонований ряд методів (протоколів) МД з контролем несучої та запобіганням зіткнень (CSMA/CA). Найбільш відомі – це MACA, MACA-BI, FAMA, MACAW, DBTMA та IEEE 802.11 DCF [15]. При застосуванні перелічених методів канал тимчасово резервується на період передачі інформаційного пакету за допомогою діалогу коротких службових пакетів між відправником та одержувачем: запит відправника на передачу (RTS) та згода одержувача (CTS).

3.3 Загальна характеристика протоколів канального рівня

Загальна характеристика протоколів канального рівня, запропонованих для використання в ЛСМ, наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Загальна характеристика протоколів канального рівня

Основні характеристики	Протокол каналного рівня			
	IEEE 802.11	Home RF	HiperLAN2	Bluetooth
Частота (ГГц)	2,4 / 5,1	2,4	5,1	2,4
Відстань (м)	100...1000	50	100...250	10...100
Швидкість передачі в каналі, Мбіт/с	11 / 54 / 150	11	54	0.7...1
Метод доступу до каналу	CSMA/CA		TDMA/TDD	Polling/TDD
Тип управління, організація мережі	Децентралізоване, всі вузли одного рівня		Зонове (кластеризація мережі), централізоване управління ресурсами в кожній зоні (пікомережі)	
Мобільність вузлів	Легко реалізується на мережному рівні		Ускладнена, викликає необхідність перебудови зон мережі	
Пропускна здатність мережі	Обмежена взаємними завадами		Визначається конфігурацією мережі, час реконфігурації мережі значний	

Аналіз таблиці дозволяє зробити висновок, що в умовах високої мобільності вузлів, характерної для більшості ЛСМ, переважним є протокол IEEE 802.11, хоча він й далекий від досконалості. До того ж дослідження засвідчують про можливість застосування протоколу IEEE 802.11 не тільки в будівлі, а й зовні. При радіусі стільника 6 км функціонування MAC протоколу відповідає усім нормам стандарту 802.11.

Окрім цього на рівні доступу (MAC) повинні вирішуватися і такі важливі задачі як синхронізація, управління енергозбереженням, роумінг, аутентифікація та шифрування та ін. Особливу увагу слід привернути до роумінгу, тобто процедурі входу назебагато вузла у зону обслуговування БПЛА, перехід від

однієї зони БПЛА до іншої, та переключення між зонами БПЛА при знаходженні вузла одночасно у декілька зонах обслуговування.

Визначення маршруту для кожного пакету є складною та відповідальною операцією і може здійснюватися як бортовими комплексами БПЛА, так і наземними вузлами. Відзначимо, що маршрутизатор БПЛА-вузла має ті ж самі функціональні властивості, що й маршрутизатор будь-якого наземного вузла. Це дозволяє використовувати існуючі протоколи маршрутизації, що розроблені для MANET, та, ще більш важливо, відмовитись від потреби допоміжного протоколу, що координує прибуття та відліт БПЛА з протоколом маршрутизації [17].

В теперішній час для використання в ЛСМ запропонований ряд протоколів маршрутизації, які по способу побудови та підтримки маршруту класифікуються на дві основні групи [18]:

- таблично-орієнтовні (DSDV, WRP, OLSR та ін.);
- зондові (DSR, AODV, TORA та ін.);
- гібридні (ZRP, R-зоновий та ін.)

При застосуванні таблично-орієнтовних методів кожен вузол постійно – на основі періодичного обміну вмістом маршрутних таблиць із сусідніми вузлами – будує маршрутну таблицю, що вміщає найкоротші шляхи (по критерію мінімальної вартості, де під вартістю може розумітися число ретрансляцій, час доставки, затрачена потужність передавача та ін.) до усіх інших вузлів.

При зондовій маршрутизації вузли формують маршрут передачі інформації по мірі необхідності («on-demand»), шляхом хвильової розсилки по мережі службових пакетів малого розміру (зондів-запитів) та збору зондів-відповідей, що вміщують інформацію про найкоротші маршрути (за вибраним критерієм) передачі інформації. Ця розсилка продовжується до тих пір, поки маршрут до необхідного вузла не буде встановлено, та знов відновлюється, коли

встановлений маршрут втрачається. Такі протоколи ідеально підходять для застосування у ЛСМ на основі БПЛА, оскільки підтримують усі можливі випадки використання БПЛА для підвищення зв'язності наземних вузлів. Переміщення БПЛА у зазначене місце (наприклад, район «проблемної» гілки, як показано на рис. 3.2) еквівалентне введенню в мережу нового вузла зв'язку. При пошуку маршрутів між вузлами лівої (МА1, МА2, МА3) та правої (МА4, МА5, МА6) частини мережі шляхом розсилки зондів-запитів буде встановлено маршрути із використання БПЛА. Коли «проблемна» гілка мережі буде відновлена (тобто відбудеться злиття лівої та правої частини мережі), БПЛА може легко покинути заданий район баражування, а втрачені мережні маршрути завдяки «on-demand» природі можуть бути легко відтворені через проміжні наземні вузли.

Організація каналу по маршруту передачі інформації може здійснюватися двома способами: шляхом комутації каналів або шляхом комутації пакетів.

Перший спосіб полягає в створенні каналу «від кінця до кінця», з подальшою передачею повідомлення по всьому маршруту без розбиття на пакети. Недоліком такого способу є неможливість використання задіяних БПЛА-вузлів іншими абонентами, як під час прокладки маршруту, так і під час передачі повідомлення, а висока динаміка топології мережі швидко руйнує побудований канал.

Комутація пакетів має два основні різновиди [19]:

- комутація пакетів, при якій окремі пакети по мережі передаються незалежно по різних шляхах та «зшиваються» в повідомлення безпосередньо у абонента-одержувача інформації (це так званий датаграмний режим);

- комутація віртуальних каналів, при якій всі пакети одного повідомлення досягають одержувача по одному маршруту, визначуваному на етапі встановлення віртуального каналу.

Принципова відмінність комутації каналів від комутації віртуальних каналів полягає в наступному:

- у першому випадку канал недоступний для інших абонентів, навіть якщо в деякий момент часу по ньому нічого не передається

- у другому випадку має місце статистичне розділення каналів або поодиночі віртуальному каналу, або по окремих його ділянках можуть передаватися інформаційні пакети різних абонентів.

Комутація пакетів володіє рядом переваг. Це ефективне використання пропускної здатності мережі, висока надійність і живучість, пов'язані з можливістю використання альтернативних маршрутів при виході з ладу окремих вузлів мережі або зіткненні пакетів. Проте реалізація переваг цього методу досягається тільки при відповідному управлінні інформаційними потоками, яке дозволяє забезпечити оптимізацію маршрутів і рівномірний розподіл навантаження на мережу.

При проектуванні цих систем необхідно забезпечити широкі можливості обслуговування абонентів та велику кількість каналів, що одночасно діють, за рахунок значного ускладнення бортової апаратури БПЛА-ретрансляторів, що розробляється на основі нових інформаційних технологій. Так будуть вирішуватися завдання: передача будь-яких даних в цифровій формі – текст, зображення, мова, обмін інформацією між базами даних, між комп'ютерами, збір даних від датчиків контролю екологічної інформації, навколишнього середовища, технологічних систем контролю. При цьому забезпечується можливість використання достатньо простих терміналів, що не вимагають висококваліфікованого обслуговування, як стаціонарними, так і рухомими споживачами.

В цілому ЛСМ передачі інформації з використанням БПЛА характеризуються значно вищою складністю і рівнем організації, чим існуючі системи передачі інформації.

Основними особливостями ЛСМ на основі БПЛА, що існують з погляду їх аналізу і синтезу, є:

1. Складність структури мережі. Інформація передається пакетами через ретранслятори - вузли мережі. Радіоканали між джерелами інформації і БПЛА-вузлом, між БПЛА-вузлами та між БПЛА-вузлом і споживачем інформації самі є складними системами передачі інформації.

2. Динамічність топології мережі, тому безперечні переваги ЛСМ на основі БПЛА мають і зворотну сторону:

- нестійка зв'язність;
- складність маршрутизації;
- велика чутливість стану до дії перешкод;
- наявність доплерівських зсувів несучих частот;

3. Функціонування таких складних мереж не можливе без ефективної системи управління [20], складовою частиною якої є підсистема управління мережею БПЛА.

3.4 Аналіз методів підвищення пропускної здатності ЛСМ із застосуванням ТА

Через низьку енергетику супутникових радіоліній та обмежену функціональність супутників зв'язку на їх зміну приходять нові телекомунікаційні системи на основі платформ повітряного базування, роль яких можуть виконувати безпілотні літальні апарати (БПЛА) [21]. Традиційно, акцент робився на відносно великі платформи, такі як Global Hawk та Predator, але останнім часом зростає увага до малих «мініатюрних БПЛА» (МБПЛА), що є більш дешевими, простими в експлуатації, легкими для транспортування, та не потребують злітно-посадочної смуги або спеціальної пускової установки [22].

Такі МБПЛА, оснащені засобами зв'язку, можуть більш детально досліджувати важкодоступні райони (стихійних лих, техногенних катастроф тощо) та підвищувати ефективність функціонування наземних радіомереж, зокрема пропусну здатність мережі.

Недостатньо розв'язаною на сьогодні є задача оптимального оперативного розміщення множини телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для підвищення пропускної здатності мережі із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних абонентів.

Отже запропоновані на сьогодні методи, що закладаються в систему управління топологією (місцеположенням) телекомунікаційних аероплатформ, вирішують лише часткові задачі забезпечення геометричної зв'язності роз'єднаних компонентів мережі, не враховуючи обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження та обслуговування пакетів в вузлах мережі. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, не враховуючи характер мобільності абонентів та маневреність БПЛА, а отже підлягають вдосконаленню. Існуючі методи планування наземних радіомереж також не ефективні, оскільки мають велику складність та час обчислення, що не дозволяє БПЛА відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Висновки до розділу

Аналіз функціонування ЛСМ на основі БПЛА показав, що вони відносяться до класу складних, багаторівневих, багатофункціональних, динамічних систем, що при розробці мають ряд проблем, пов'язаних з побудовою та підтримкою структури заданої зв'язності, якості обслуговування мобільних абонентів, підвищення пропускної здатності мережі. Функціонування таких складних мереж не можливе без ефективної системи управління, складовою частиною якої є підсистема управління топологією (місцеположенням) мережі БПЛА

Таким чином, методика оцінки показників функціонування ЛСМ з телекомунікаційними аероплатформами в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів для подальшого використання в управлінні положенням ТА є актуальною на сучасному етапі розвитку інтелектуальних радіомереж із самоорганізацією і має не тільки теоретичне, а й прикладне значення для забезпечення ефективного функціонування сучасних телекомунікаційних систем та мереж.

4. МЕТОД ВИБОРУ ТОЧКИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ В ЛІТАЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

4.1 Побудова математичних моделей оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мережах з телекомунікаційними аероплатформами

Для побудови математичних моделей використаємо наступні вихідні дані і обмеження:

Вихідні дані: $V = 11 \text{ Мбіт/с}$ – швидкість передачі; $L = 1024$ біт – довжина пакету даних; $\Pi = \|\Pi(m_{ab})\|$, $a, b = \overline{1, N}$ – маршрутна таблиця найкоротших шляхів, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій в маршруті m_{ab} ; $\Gamma = \|\Gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння, де γ_{ab} – середня інтенсивність потоку пакетів (на ЧНН), що надходить в маршрут m_{ab} між парою відправник-адресат a - b ; $s^o = 5,5 \text{ Мбіт/с}$ – мінімально допустиме значення ПЗ (пропускна здатність) маршруту m_{ab} ; $t_3^o = 400 \text{ мс}$ – максимально допустиме значення затримки передачі в маршруті m_{ab} (для послуг реального часу та передачі даних з невисокою інтерактивністю згідно ІТУ Y.1541).

Позначимо через γ сумарний трафік користувача, тобто $\gamma = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}$, $a, b = \overline{1, N}$;

Обмеження. Якість маршрутів в літаючих сенсорних мережах можна записати наступним чином:

$$\Omega_2: \{ s(m_{ab}) \geq s^o, t_3(m_{ab}) \leq t_3^o, a, b = \overline{1, N}, a \neq b \}.$$

Також зробимо наступні допущення:

- 1) в мережі передається однорідний трафік (без пріоритетів);
- 2) потік надходження пакетів на обслуговування в сенсорах мережі підкорюється пуасонівському розподіленню, тобто $A(\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau)$, де λ – інтенсивність надходження пакетів на обслуговування.

- 3) розподілення часу обслуговування $B(t)$ може бути довільним та визначається двома параметрами: інтенсивністю обслуговування μ та дисперсією D .
- 4) спосіб обслуговування пакетів у сенсорах мережі – з очікуванням без обмеження довжини черги.
- 5) дисципліна обслуговування пакетів в буфері – FIFO («перший прийшов – перший обслуговується»); вважається, що виконується умова не зростання черги $1/\mu < 1/\lambda$.
- 6) протоколи множинного доступу: МДСЗ (множинний доступ із сигналом «зайнято») (МА-МА); АПР (адаптивний протокол із резервуванням) (МА-БПЛА-МА); FDMA (множинний доступ із розділенням каналів за частотою) (БПЛА-БПЛА).
- 7) всі мобільні абоненти (МА) працюють на одній частоті f_1 , телекомунікаційні аероплатформи (ТА) працюють на різних частотах прийому і передачі з МА, ТА працюють на різних частотах між собою; висота баражування БПЛА: $h_j \leq 3000 \text{ м}$, $j = \overline{1, K}$, де K – кількість на операцію БПЛА: $K = 1 \dots 10$
 Канал МА-МА: напівдуплексний одночастотний (f_1). Канал МА-БПЛА-МА: дуплексний двох частотний ($f_2 - f_3$). Канал БПЛА-БПЛА: дуплексний багато частотний.
 Ширина смуги каналу: $\Delta f_1 = \dots = \Delta f_5 = 20 \text{ МГц}$. Діапазон частот: 2,4 ГГц.
 Модель радіоканалу МА-МА – Релея із незалежними завмираннями, усі інші канали – із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ).
- 8) потужність передавача: $P_j = \text{const}$, $j = \overline{1, K}$; кількість абонентів в мережі: $N < 500$; координати абонентів: (x_i, y_i) , $i = \overline{1, N}$; швидкість переміщення: $v_i = \text{const}$, $i = \overline{1, N}$.
- 9) топологія мережі відома та під час аналізу не змінюється.

10) в мережі функціонує один з протоколів маршрутизації (наприклад, OLSR), який дозволяє отримувати сенсорам найкоротші маршрути по критерію мінімуму ретрансляцій, службове навантаження враховувати не будемо.

4.2 Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах літаючих сенсорних мережах з телекомунікаційними аероплатформами

Для побудови математичних моделей оцінки показників функціонування необхідно визначити навантаження в мережі. Тому на основі апарату теорії телекомунікаційних мереж [18] та теорії масового обслуговування [23] використано прості математичні моделі для розрахунку інтенсивності трафіку в каналах літаючих сенсорних мереж (рис.4.1).

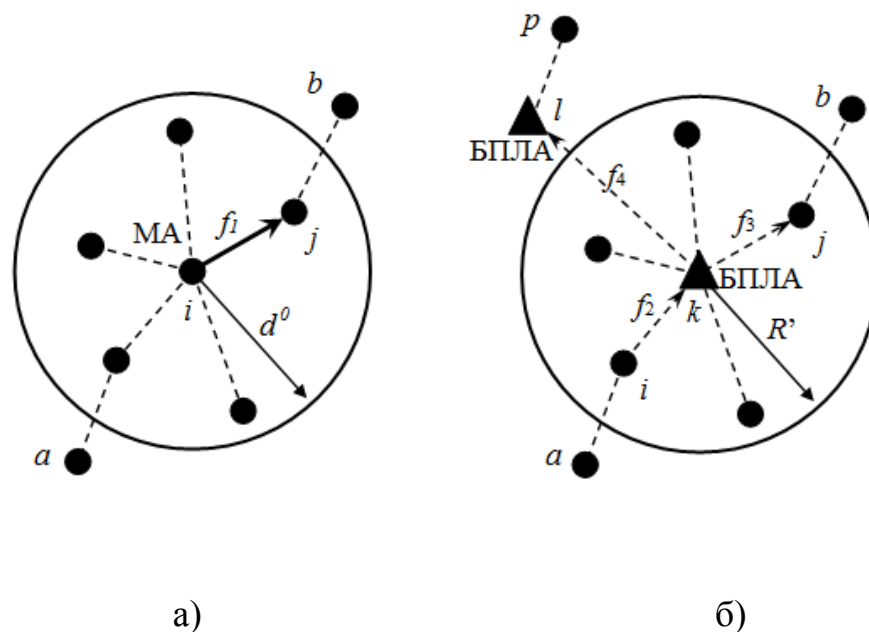


Рис. 4.1 Моделі для розрахунку інтенсивності трафіку в каналі МА-МА (а) та в каналах МА-БПЛА, БПЛА-БПЛА (б)

Використовуючи запропоновані моделі розрахуємо інтенсивність трафіку в кожному каналі МСМ, як суму інтенсивностей потоків між заданою парою відправник-адресат γ_{ab} , маршрути яких проходять через заданий канал.

Тоді для ширококомовного одночастотного каналу МА-МА інтенсивність трафіку можна визначити наступним чином:

$$\lambda_i^{(1)} = \sum_{j \in N_i} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: i \in m_{ab}, \quad a \neq b \quad (1)$$

де N_i – множина сусідів i -ого МА, включаючи i .

Для спільного каналу МА-БПЛА та ширококомовного каналу БПЛА-МА відповідно:

$$\lambda_{ik}^{(2)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: ik \in m_{ab}; \quad \lambda_{kj}^{(3)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab},$$

$$a, b: kj \in m_{ab}, \quad a \neq b, \quad (2)$$

де N_k – множина МА, що покриті k -м (БПЛА) безпілотним літаючим апаратом.

Для дуплексного багаточастотного каналу БПЛА-БПЛА (в одному напрямку) відповідно:

$$\lambda_{kl}^{(4)} = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: kl \in m_{ab}, \quad k \neq l, \quad a \neq b. \quad (3)$$

4.3 Дослідження ПЗ в каналах літаючих сенсорних мережах

Основними характеристиками, що визначають ефективність функціонування протоколу множинного доступу до загального каналного ресурсу, є [15, 23]: середня швидкість передачі, середня затримка передачі та граничне значення трафіку, при якому досягається межа стійкої роботи мережі (межа стійкості). Ці параметри визначаються як функція системних параметрів, серед яких основними є інтенсивність трафіку, швидкість передачі, довжина пакету, геометричні розміри мережі або узагальнюючий їх інтервал уразливості.

Для аналізу вище вказаних характеристик та визначення їх потенційно можливих значень будемо використовувати аналітичні моделі, що будуються із використанням елементів теорії відновлення та припущення, що кількість абонентів нескінченно велика, кожен з яких генерує пакети з нескінченно малою швидкістю. Останнє є фактично припущенням про пуасонівський характер процесу надходження пакетів для передачі по радіоканалу. При цьому інтенсивність надходження пакетів вимірюється кількістю за час передачі пакету T та позначається буквою G . Середня швидкість передачі S також вимірюється в кількості пакетів за час T , але що передані безконфліктно. Припускається також, що всі пакети мають однакову довжину L . Данні моделі оперують із середніми значеннями часових відрізків стану радіоканалу. Також будемо вважати, що службові пакети (квитанції), що підтверджують вдалий прийом пакету даних, мають нормовану довжину та передаються по окремому каналу безконфліктно.

Під інтенсивністю G надходження пакетів на передачу, що була вказана раніше, будемо розуміти сумарну інтенсивність, що включає як вхідний потік первинних пакетів Z_1 , так і потік пакетів Z_2 , що передаються повторно. Потік Z_1 кожного сенсора формують як власні пакети, так ті, що потрібно ретранслювати від інших сенсорів (визначаються згідно заданої матриці тяжіння Γ), а потік Z_2 визначаються процедурними характеристиками протоколу МД та значеннями його системних параметрів, а саме інтервалом часу перед повторною передачею. На практиці для стійкої роботи мережі інтенсивність поточного трафіку не має перевищувати $0,8g$, де g – поріг стійкості, що визначається типом протоколу МД [24].

Пропускна здатність маршруту визначається мінімальною пропускнуою здатністю каналу, що входить до його складу, тобто

$$s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}, \text{ де } c_{ij} - \text{ПЗ каналу.} \quad (4)$$

Під пропускнуою здатністю каналу будемо розуміти середню швидкість передачі пакетів, тобто середню кількість безконфліктно переданих пакетів за

інтервал часу (в даній роботі за одиницю часу прийнято час передачі самого пакету $T = \mu$). Дана величина визначається протоколом множинного доступу, що використовуються в каналі. Для каналів МА-МА обрано протокол множинного доступу із сигналом «зайнято» (МДСЗ) для вирішення проблеми «скритих абонентів». Для каналів МА-БПЛА-МА обрано адаптивний протокол множинного із резервуванням пакетів (АПР), що дозволяє надсилати не один, а блоки n пакетів та управляти розміром блоку згідно інтенсивності трафіку, створюваного абонентами, на етапі оперативного управління. Для каналів БПЛА-БПЛА обрано частотне ущільнення згідно стільникового принципу в поєднанні з динамічним розподілом часового інтервалу всередині окремої комірки [23], тобто пакети передаються на окремій частоті фактично без колізій і ПЗ таких каналів дорівнює 1.

Середню швидкість передачі каналу МА-МА, що працює на частоті f_1 згідно протоколу МДСЗ, можна визначити за наступною формулою [24]:

$$s_{ij}^{(1)} = \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{(\exp(2aG_{\Sigma}^{(1)}) - 1)((5a + \tau + 0,5)G_{\Sigma}^{(1)} + \exp(-2aG_{\Sigma}^{(1)})) + G_{\Sigma}^{(1)}(4a + \tau + 1) + 1}, \quad (5)$$

де a, τ – нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу та сигналу «зайнято»;

$$G_{\Sigma}^{(1)} = \frac{\lambda_i^{(1)}}{\mu} = \lambda_i^{(1)}T - \text{сумарна інтенсивність трафіку, що надходить в канал}$$

МА-МА, нормована до тривалість передачі пакету T .

$$a = \frac{x \cdot V}{c \cdot L} - \text{нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу.}$$

застосовуючи, наприклад, адаптивний протокол випадкового МД із резервуванням (АПР), значення середньої швидкості передачі у каналах МА-БПЛА можна визначити наступним чином:[25]

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + GB},$$

де N – розмір блоку пакетів, що резервуються;

B – середній час зайнятого стану каналу, який можна визначити наступним чином:

$$B = (N + b + 2a - r) \exp(-aG) + b + a + r,$$

де b – тривалість пакету резервування, що надсилає абонент, та пакету дозволу на передачу, що надсилає у відповідь ретранслятор;

r – тривалість часу від надходження останнього конфліктного пакету, який можна визначити наступним чином: $r = a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G}$.

Враховуючи, що G – це інтенсивність надходження блоків з N пакетів, пропускну здатність каналів МА-БПЛА, БПЛА-БПЛА можна записати так:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + G \left((N + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G} \right)} \quad (6)$$

4.4 Дослідження затримки передачі в літаючих сенсорних мережах

Середня затримка передачі – це нормований інтервал часу (в одиницях тривалості передачі пакету T) з моменту появи на вході сенсора запиту на передачу до завершення безконфліктної передачі пакету даних. При чому враховується тільки два фактори, що перешкоджають передачі: затримка доступу, тобто час до моменту отримання дозволу на передачу, та затримка повторної передачі, що зумовлена лише пошкодженням пакетів при їх інтерференції.

Організація інформаційної взаємодії на мережному рівні між будь-якою парою абонентів мережі потребує наявності маршруту передачі даних заданої якості (QoS). Критерієм якості або метрикою маршруту (наприклад, при передачі

голосового трафіку) може виступати кількість ретрансляцій або ж величина затримки передачі пакету із кінця в кінець через мережу проміжних сенсорів-ретрансляторів. У загальному вигляді ця величина матиме наступний вигляд: $D = T_{\text{пак}} + T_{\text{дост}} + T_{\text{росп}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}}$, де $T_{\text{пак}}$ – час пакетизації (формування пакету у сенсорі-відправнику), що залежить від типу трафіку (алгоритму формування пакету, наприклад, для голосу – від типу кодеку); $T_{\text{дост}}$ – середній час затримки доступу до каналу (для випадкового МД), що залежить від інтенсивності трафіку та пропускної спроможності каналу; $T_{\text{росп}}$ – час розповсюдження сигналу в середовищі передачі (не залежить від типу трафіка); $T_{\text{обр}}$ – час обробки пакету в проміжних сенсорах мережі (залежить від типу трафіку); $T_{\text{буф}}$ – час затримки у буфері проміжних сенсорів мережі (залежить від типу трафіку, дисципліни обслуговування, пріоритетності трафіку (SLA)). Для пакету IP середньої довжини 576 біт та при швидкості кодування 64кбіт/с час пакетизації становитиме 9 мс, чим можна знехтувати при грубій оцінці затримки передачі. Також будемо вважати, що пакети, які знаходяться на приймач, відразу потрапляють в буфер, а отже $T_{\text{обр}}$ також дорівнює нулю.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування літаючі сенсорні мережі можна представити через сукупність блоків M/G/1 (рис.4.2).[26]

Тоді середній час перебування пакета в черзі буфера можна розрахувати за наступною формулою[26]:

$$T_{\text{буф}} = T + W^{(z)}(1 + v^2) = \frac{1}{\mu} + \frac{G_{\Sigma}^{(z)}}{2\mu(1 - G_{\Sigma}^{(z)})}(1 + v^2), \quad (7)$$

де $W^{(z)}$ – середній час затримки пакету в черзі при $\mu = \text{const}$;

v – коефіцієнт варіації μ ;

$$G_{\Sigma}^{(z)} = \frac{\lambda_{\Sigma}^{(z)}}{\mu} = \lambda_{\Sigma}^{(z)} T$$

- сумарна інтенсивність трафіку, що надходить на частоті z .

частоті z .

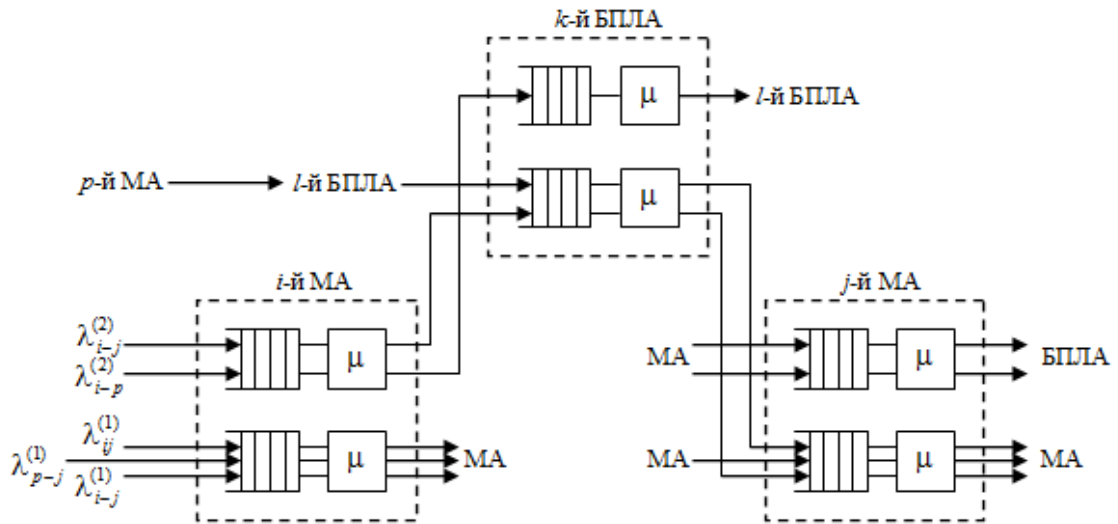


Рис. 4.2. Літаюча сенсорна мережа, як мережа блоків типу M/G/1

Було проведено імітаційне моделювання середнього часу перебування пакету в блоці типу M/G/1 (дані наведені у табл. 4.1), що підтверджують адекватність обраної аналітичної моделі (7).

Результати моделювання середнього часу перебування пакету в блоці типу M/G/1 представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати моделювання

Кіл-ть оброб. Пакетів	Інтен-ть надх. пакетів λ	Час обслуг. $1/\mu$	Коеф. варіації ν	$T_{\text{буф}}$ (результати розрах.)	Результати імітаційного моделювання	
					$T_{\text{буф}}$	СКВ σ_T
10000	$1 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$4,49 \cdot 10^{-6}$	1,258
10000	$1 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$	1,412
10000	$1,0999 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,45	0,32	1,505

Тоді середній час затримки передачі пакету на ланці МА-МА матиме наступний спрощений вигляд:

$$D_{ij} = \left(\frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{s_{ij}^{(1)}} - 1 \right) (4a + \tau + 0,5 + Y + X) + 4a + \tau + 1 + W_i^{(1)}, \quad (8)$$

де X – нормований середній час затримки повторної передачі;

Y – нормований середній час початку передачі останнього конфліктуєчого пакету.

У свою чергу середній час затримки передачі пакету на ланці БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА) матиме наступний вигляд:

$$D_{ik} = \frac{1}{N} \left(\left(\frac{1}{P} - 1 \right) (X + (b + a + r)P_I) + N + a + W_i^{(2)} + W_k^{(3)} \right), \quad (9)$$

де $P = \frac{\exp(-aG)}{1 + GB}$ - ймовірність вдалої передачі блоку пакетів;

$P_I = \frac{1}{1 + GB}$ - ймовірність вільного стану радіоканалу.

Оскільки канали БПЛА-БПЛА працюють з частотним розділенням, не заважаючи один одному, то будемо вважати, що максимальна затримка передачі в таких каналах однакова і визначається лише затримкою розповсюдження та затримкою в буфері проміжних сенсорів, тобто $D_{kl} = a + W_k^{(4)}$.

4.5 Результати моделювання

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11$ Мбіт/с, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $L = 1024$ біт у вираз (6), матимемо наступні графіки залежності S на каналному рівні МА-МА (рис.3.3 – 3.5).

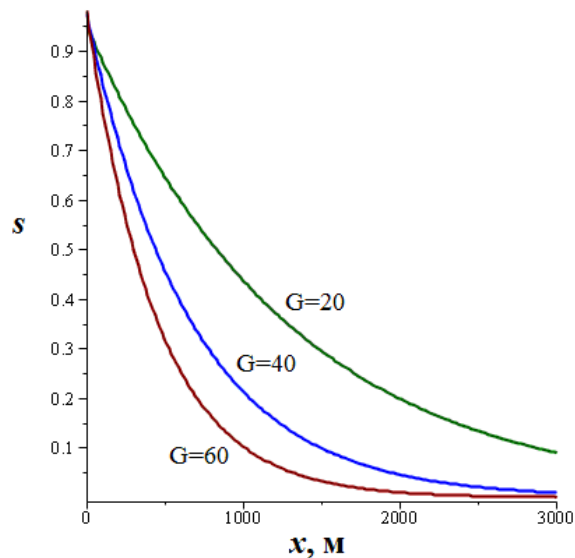


Рис. 4.3 Графіки залежності ПЗ каналу MA-MA від відстані між сенсорами при різних значеннях інтенсивності трафіку

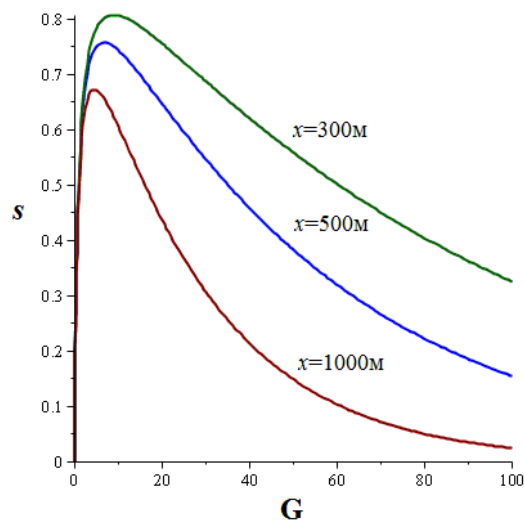


Рис. 4.4 Графіки залежності ПЗ каналу MA-MA від довжини пакету при різних значеннях відстані між сансорами (при $G=40$)

Аналізуючи графіки на рис.4.2, можемо бачити, що середня швидкість передачі монотонно спадає при збільшенні максимальної відстані між сенсорами x . Це пов'язано з тим, що при збільшенні x зростає зона уразливості a , що спричиняє ріст кількості колізій при організації МД. Також згідно рис.4.3 збільшення x призводить до зменшення межі стійкості g та діапазону стійкої роботи протоколу МД. Так при $x=300$ м ($a=0,011$) g становить приблизно 9 (

$s_{\max} \approx 0,81$), при $x=500\text{м}$ ($a=0,0183$) $g \approx 6,8$ ($s_{\max} \approx 0,76$), а при $x=1000\text{м}$ ($a=0,0366$) $g \approx 4,6$ ($s_{\max} \approx 0,67$).

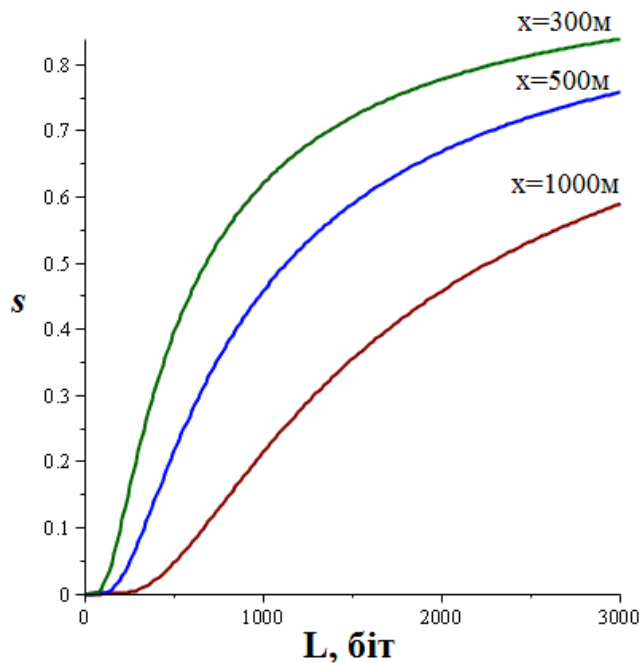


Рис. 4.5 Графіки залежності ПЗ каналу MA-MA від довжини пакету при різних значеннях відстані між сенсорами (при $G=40$)

Згідно рис.4.4 проблему збільшення пропускної здатності при заданому x (або ж еквівалентно збільшення максимальної відстані між MA x при заданій S) можна вирішити шляхом збільшення довжини пакету L , однак при цьому зростає ймовірність ураження пакета завадою та час доставки пакетів в мережі. Також цю проблему можна вирішити шляхом зменшення швидкості передачі V (тобто виділеної частотної смуги Δf), але це – нераціонально, оскільки при цьому знижують інші основні характеристики мережі – пропускна здатність та коефіцієнт використання смуги частот. Отже, вибір максимальної відстані між сенсорами (радіусу радіо покриття MA) x визначається мінімальним допустимим значенням пропускної здатності протоколу МД при заданих V та L .

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11\text{Мбіт/с}$, $c = 3 \cdot 10^8\text{м/с}$, $L = 1000\text{біт}$ у вираз (6), матимемо наступні графіки залежності S каналів МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА (рис.3.6 – 3.10).

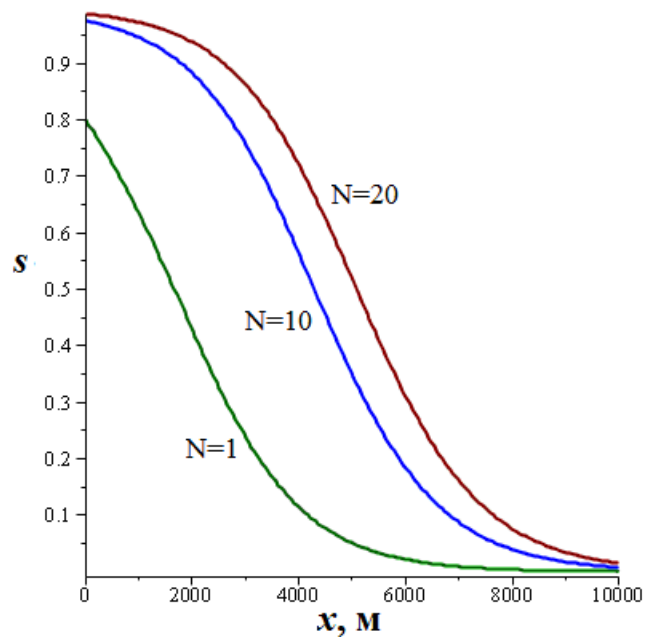


Рис. 4.6 Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від відстані між сенсорами при різних значеннях розміру блоку резервування (при $G=20$)

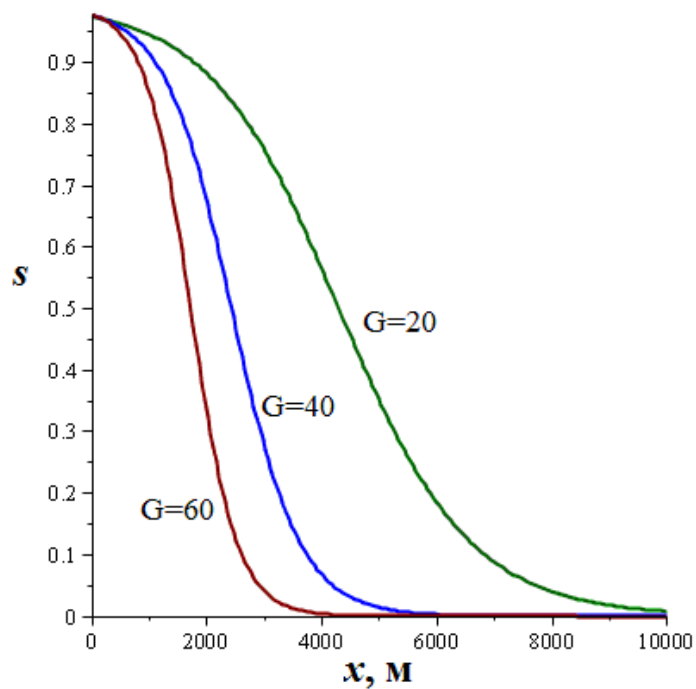


Рис. 4.7 Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від відстані між сенсорами при різних значеннях інтенсивності трафіку (при $N=10$)

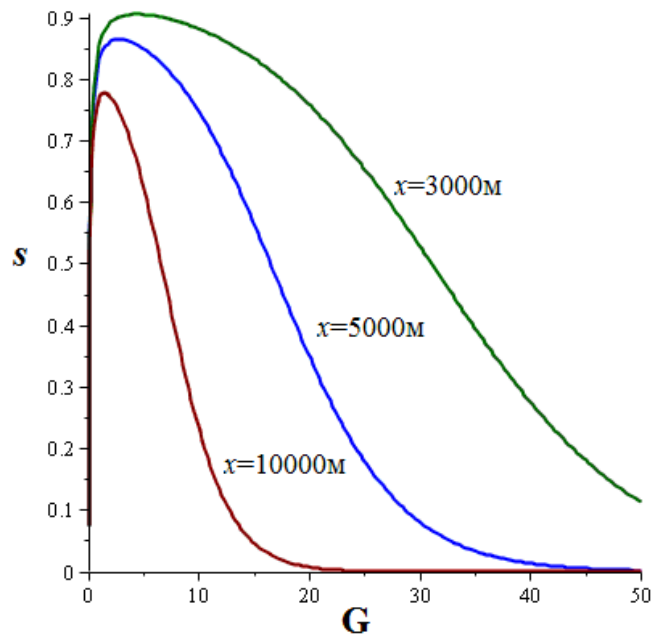


Рис. 4.8 Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від інтенсивності трафіку при різних значеннях відстані між сенсорами (при $N=10$)

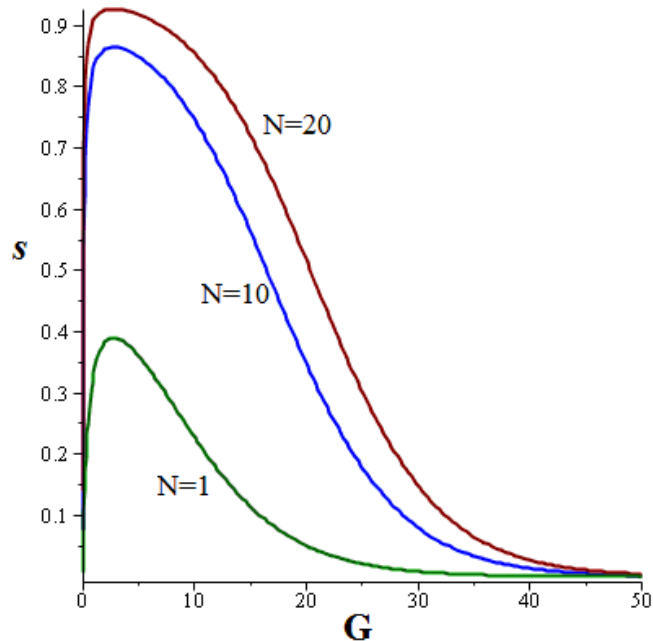


Рис. 4.9 Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від інтенсивності трафіку при різних значеннях розміру блоку резервування (при $x=5000\text{м}$)

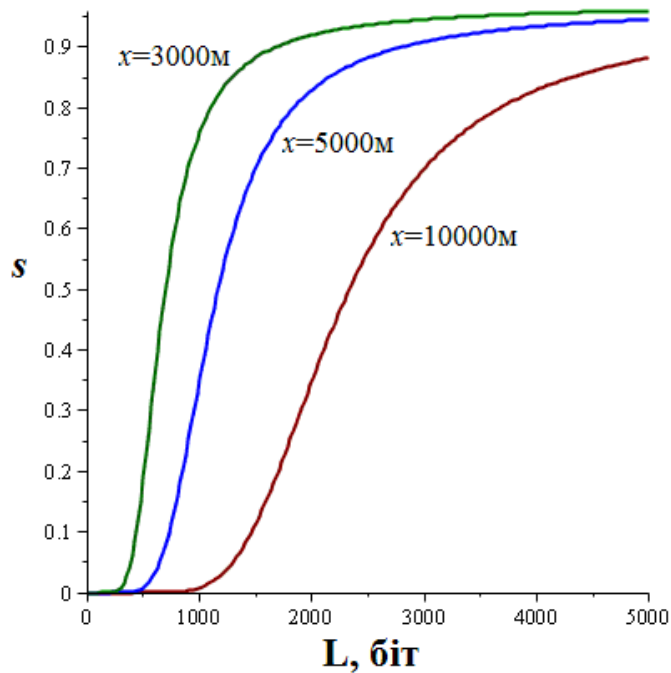


Рис. 4.10 Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від довжини пакету при різних значеннях відстані між сенсорами (при $N=10$, $G=20$)

Аналізуючи рис.4.5, можемо бачити, що застосування блочного ($N=10$, $N=20$) резервування дає змогу значно розширити максимальну відстань між БПЛА та МА при заданій пропускній здатності на відміну від звичайного гнучкого протоколу МДСЗ ($N=1$). Також згідно рис.3.7 – 3.10 можна бачити, що протокол АПР дозволяє значно розширити діапазон можливої інтенсивності трафіку та підвищити стійкість роботи мережі БПЛА при зміні вхідного навантаження.

Тоді використовуюючи аналітичні моделі для обраних протоколів МД та вихідні дані, що вказані вище, отримано графіки залежності ПЗ каналів МА-МА та МА-БПЛА-МА від вхідного навантаження G (середньої кількості пакетів, що надійшли протягом часу передачі одного пакету $T = \mu$) (рис.3.11).

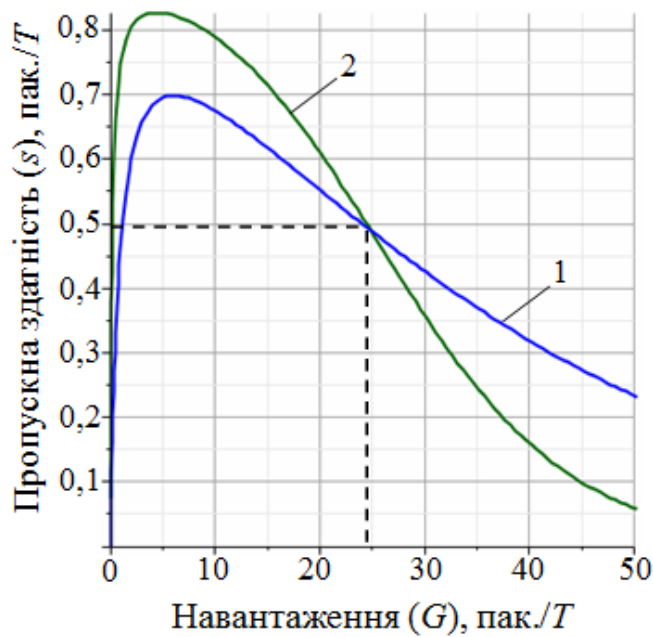


Рис. 4.11 Залежність пропускної здатності каналів ЛСМ від вхідного навантаження: 1 – канал МА-МА (МДСЗ), 2 – канал МА-БПЛА-МА (АПР, $N=5$)

Аналізуючи графіки на рис.4.10, можемо бачити, що канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку (навантаженні) у діапазоні $0...24$, що визначається мінімально можливим рівнем ПЗ ($s^0 = 0,5$). У такому випадку для підвищення ПЗ мережі доцільніше буде передавати дані через мережу телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11\text{Мбіт/с}$, $c = 3 \cdot 10^8\text{м/с}$, $L = 1000\text{біт}$, $b = 0,1$, $X = 2$ у вирази (4.11), (4.12), матимемо наступні графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при $x = 600\text{м}$) та однієї ланки БПЛА-МА (при $x = 3000\text{м}$, $N = 10, 20, 30$) від інтенсивності трафіку (рис.4.12).

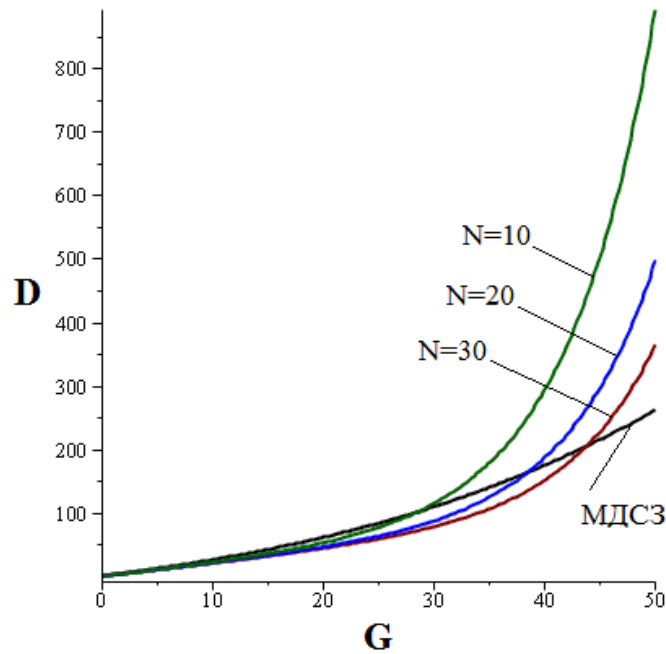


Рис. 4.12 Графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при $x = 600\text{м}$) та однієї ланки МА-БПЛА-МА (при $x = 3000\text{м}$, $N = 10, 20, 30$) від інтенсивності трафіку

Аналізуючи рис.4.12 можемо бачити, що при інтенсивності трафіку менше ніж 30 менший час затримки має ланка мережі із застосуванням БПЛА, аніж ланка МА-МА, при чому граничне значення інтенсивності трафіку тим більше, чим більше розмір блоку пакетів в протоколі АПР. Також слід зазначити, що при однаковій затримці передачі ланка із БПЛА має шестикратний вигреш у відстані. Отже для мінімізації затримки при передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА, а на короткі – через мережу МА. Тоді виникає практичний інтерес визначення граничної кількості ретрансляцій через МА, при якій необхідно переключатися на мережу БПЛА.

Якщо вважати, що маршрут передачі інформації складається з 1 ланок та кожна ланка має однакову середню інтенсивність трафіку, тоді загальна затримка пакету «із кінця в кінець» через мережі МА та мережі БПЛА становитиме відповідно:

$$t_3(m_{ab}) = D_{ij} \cdot l; \quad t_3(m_{ab}) = D_{ik} + (a + W_k)l. \quad (10)$$

Згідно отриманим аналітичним моделям обраних протоколів МД (9) було розраховано залежність середньої затримки передачі в маршруті від кількості ретрансляцій в маршруті при однаковому навантаженні в каналах (рис.3.13).

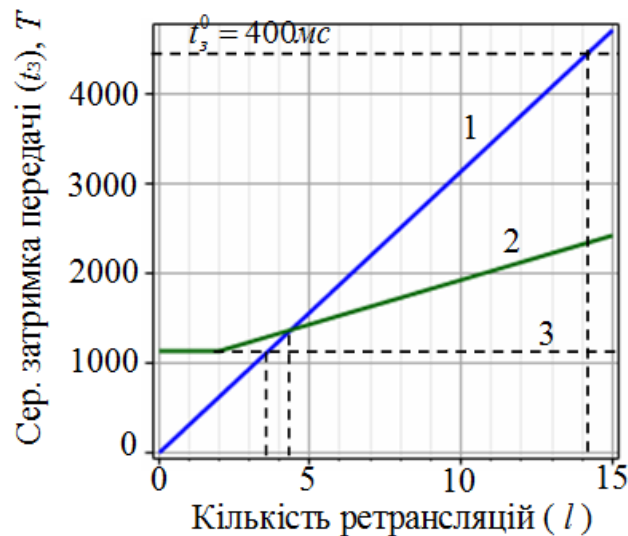


Рис. 4.13 Залежність середньої затримки в маршруті від кількості ретрансляцій для різних варіантів передачі: 1 – через мережу МА, 2 – через мережу БПЛА, 3 – через один БПЛА

Можемо бачити, що у даному випадку максимальна кількість ретрансляцій при передачі через мережу МА, що визначається заданою величиною затримки ($t_3^0 = 400$ мс), має становити не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу БПЛА. При чому всередині стільника вигідніше ретранслювати пакети при кількості ланок більше ніж 3, а через міжплатформні лінії зв'язку – більше ніж 4. Це може бути використане при пошуку оптимального (найкоротшого) маршруту між заданою парою відправник-адресат.

Методика оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мереж із ТА.

Таким чином, методика оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мереж із ТА буде мати наступні кроки:

Крок 1. Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах кожного маршруту

m_{ab} .

- a) Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах між МА-МА (згідно виразу (1)).
- b) Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах між МА-БПЛА (згідно виразу (2)).
- c) Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах БПЛА-БПЛА (згідно виразу (3)).

Крок 2. Розрахунок пропускної здатності (ПЗ) в кожному маршруті m_{ab} (згідно матриць Γ та Π).

- a) Розрахунок пропускної здатності при визначеному протоколі МД між МА-МА (згідно виразу (4) для протоколу МДСЗ).
- b) Розрахунок пропускної здатності при визначеному протоколі МД між МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА (згідно виразу (5) для протоколу АПР).
- c) Визначення пропускної здатності маршруту (згідно виразу (6)).

Крок 3. Визначення часу затримки в кожному маршруті m_{ab} (згідно матриць Γ та Π).

- a) Визначення часу затримки передачі пакету на ланці МА-МА.
- b) Визначення часу затримки передачі пакету на ланці БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА) (згідно виразів (8,9)).
- c) Визначення часу затримки в маршруті (згідно виразу (10)).

Висновки до розділу

В розділі запропонована методика оцінки показників функціонування літаючих сенсорних мереж з ТА, яка дозволяє оцінити залежності пропускної здатності, часу затримки передачі за визначеними маршрутами від рівня навантаження, відстані між абонентами та прийнятими методами множинного

доступу. Пропускна здатність маршруту передачі даних визначається мінімальною пропускнуою здатністю каналу, який входить до його складу.

Наведено, що канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку. Тобто для підвищення пропускнуої здатності мережі доцільніше буде передавати дані через мережу ТА (БПЛА) при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

При необхідності передачі даних на велику відстань, яка є більшою за дальність прямого з'єднання, необхідно використовувати механізм ретрансляції пакетів через проміжні сенсори. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу БПЛА.

Також отримано наступні результати моделювання:

- середня швидкість передачі монотонно спадає при збільшенні максимальної відстані між сенсорами x .
- застосування блочного ($N = 10, N = 20$) резервування дає змогу значно розширити максимальну відстань між БПЛА та МА при заданій пропускнуій здатності на відміну від звичайного гнучкого протоколу МДСЗ ($N = 1$).
- протокол АПР дозволяє значно розширити діапазон можливої інтенсивності трафіку та підвищити стійкість роботи мережі БПЛА при зміні вхідного навантаження
- канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку (навантаженні) у діапазоні $0 \dots 24$, що визначається мінімально можливим рівнем ПЗ
- при інтенсивності трафіку менше ніж 30 менший час затримки має ланка мережі із застосуванням БПЛА, аніж ланка МА-МА, при чому граничне значення інтенсивності трафіку тим більше, чим більше розмір блоку пакетів в протоколі АПР. Також слід зазначити, що при однаковій затримці передачі ланка із БПЛА має шестикратний вигравш у відстані. Отже для

мінімізації затримки при передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА, а на короткі – через мережу МА.

В подальшому пропонується використання запропонованої методики для управління топологією (положенням та переміщенням ГА) літаючою сенсорною мережею для оптимізації параметрів її функціонування.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день сенсорні мережі інтенсивно розвиваються, удосконалюються та стають важливою складовою частиною інформаційного суспільства. Безпроводові сенсорні мережі збору і передачі даних можуть бути легко адаптовані до вирішення багатьох завдань практично в будь-яких сферах діяльності. Популярними є організація різних систем контролю та моніторингу, створення систем швидкого реагування в надзвичайних ситуаціях.

Літаюча сенсорна мережа - бездротова сенсорна мережа, в якій сенсори є рухомими. ЛСМ - це нова галузь досліджень, на відміну від їх добре зарекомендованих себе попередників. ЛСМ набагато більш універсальні, ніж статичні сенсорні мережі, оскільки їх можна розгорнути в будь-якому сценарії і впоратися зі швидкими змінами топології. Мобільність може додатково вирішувати проблеми адресної затримки. Більшість фундаментальних характеристик літаючої сенсорної мережі такі ж, як у звичайного статичного БСМ.

Можливі сценарії застосування традиційних безпроводових сенсорних мереж, які в даний час передбачені, включають в себе моніторинг навколишнього середовища, будинки з цифровим обладнанням військового спостереження, моніторинг стану здоров'я, моніторинг виробництва, конференцію, відстеження та виявлення транспортних засобів і контроль за інвентаризацією.

Вважається, що мобільна БСМ зможе вирішувати безліч додатків, як тільки «світ» стане розумним. Майбутні сценарії програм:

- Інтелектуальна транспортна система
- Безпека
- Соціальна взаємодія
- Здоров'я
- Розумне місто

Сучасні мобільні сенсорні мережі доцільно будувати за технологіями наступного покоління NGN, забезпечуючи передачу різних видів інформації з великою швидкістю, таких як: даних про стан того або іншого об'єкта чи групи об'єктів, мовні та телеметричні сигнали в цифровій формі. До специфічних особливостей МСР належать підвищені вимоги до оперативності розгортання і мобільності, надійності мереж, достовірності передачі даних, а також можливість працювати з високомобільними абонентами, необхідність керування енерговитратами для максимального часу життя мережі.

Запропонована методика оцінки показників функціонування мобільних сенсорних мереж з ТА, яка дозволяє оцінити залежності пропускної здатності, часу затримки передачі за визначеними маршрутами від рівня навантаження, відстані між абонентами та прийнятими методами множинного доступу. Пропускна здатність маршруту передачі даних визначається мінімальною пропускною здатністю каналу, який входить до його складу.

Наведено, що канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку. Тобто для підвищення пропускної здатності мережі доцільніше буде передавати дані через мережу ТА (БПЛА) при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

При необхідності передачі даних на велику відстань, яка є більшою за дальність прямого з'єднання, необхідно використовувати механізм ретрансляції пакетів через проміжні сенсори. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу БПЛА.

Побудовано аналітичні моделі для визначення навантаження в мережі МА-МА, МА-БПЛА, БПЛА-БПЛА.

Досліджені математичні моделі показників функціонування ЛСМ з ТА, а саме пропускної здатності та середнього часу затримки при передачі. Проведений машинний експеримент з використанням імітаційного моделювання та аналітичного моделювання.

За результатами моделювання визначено максимальну відстань передачі даних для мобільних абонентів (600 м) та БПЛА (3000 м). Визначено максимальну кількість ретрансляцій в мережах МА-МА, яка дорівнює 14, БПЛА-БПЛА – 4 ретрансляції.

Запропонована методика в подальшому буде використана для управління топологією (положенням та переміщенням ТА) літаючих сенсорних мереж для оптимізації параметрів її функціонування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. K. Akkaya, M. Younis, A survey on routing protocols for wireless sensor networks, Elsevier Journal of Ad Hoc Networks 3 (3) (2005) 325–349.
2. X. Han, X. Cao, E. L. Lloyd and C. Shen, “Fault-Tolerant Relay Node Placement in Heterogeneous Wireless Sensor Networks”, IEEE Transaction on Mobile Computing, Vol. 9, No. 5, May 2010
3. J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal. Wireless sensor network survey, Computer Networks 52 (12) (2008) 2292–2330.

4. X. Chen and N. Rowe, "An Energy-Efficient Communication Scheme in Wireless Cable Sensor Networks", Proc. of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC), June 2011
5. M A Matin, and Md. Nafees Rahman, "Lifetime improvement of Wireless Sensor Networks" 3rd IEEE International conference on Communication Software and Networks (ICCSN) 2011, Xi'an, China, May 27-29, 2011, pp.475-479.
6. Bharathidasan, A., Anand, V., Ponduru, S. (2001), Sensor Networks: An Overview, Department of Computer Science, University of California, Davis 2001. Technical Report C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Proceedings of the 6th ACM 226 ROUTING PROTOCOLS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), Boston, MA, Aug. 2000, pp. 56–67.
7. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine. 40 (8) (2002) 102–114.
8. A Comparative Analysis of Beaconless Opportunistic Routing Protocols for Video Dissemination over Flying Ad Hoc Networks / T. Braun and all. // NEW2AN 2014, LNCS 8638. Springer.
9. Airborne Mobile Networking Research at Boeing/ Jae H. Kim // Aerospace 2013Conference Workshop on "Airborne Networks and Communications". – 2013.
10. Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, И. А. Богданов, А. А. Дорт-Гольц // Электросвязь – 2014. – № 9. – С. 2–5.
11. Громаков Ю.А. Концепции развития мобильной и беспроводной связи общего пользования / Ю.А. Громаков // Электросвязь, 2008. – № 12. – С. 51 – 57.

12. Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>.
13. Perkins C.E. Ad Hoc Networking, Addison-Wesley Professional, 2001.
14. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи / А.Ю. Гребешков – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
15. Миночкин А. И. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок, 2004. – № 2. – С. 46 – 50.
16. Бунин С. Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью / С. Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Техника, 1989. – 223 с.
17. Chandrashekar K. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms / K. Chandrashekar, M. R. Dekhordi, J. S. Baras // IEEE MILCOM'04 : Military Communications Conference – 2004. – Vol. 3. – P. 1429 –1436.
18. Романюк В. А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий / В. А. Романюк – Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62 – 68.
19. Романов А. И. Телекоммуникационные сети и управление: Учебное пособие / А. И. Романов. – К.: Изд-во «Киевский университет», 2003. – 247 с.
20. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В.А.Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83 – 90.
21. Ильченко М. Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ / М.Е. Ильченко, С. А. Кравчук. – К.: Наукова думка, 2008. – 580 с.
22. Han Z. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A. L. Swindlehurst, K. J. R. Liu // IEEE Wireless Communications and Networking conference, 2006. – P. 252 – 257.

23. Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics / L. Kleinrock, F. A. Tobagi // IEEE Transactions on communications. – 1975. – Vol. 23. – №12. – P. 1400 – 1416.
24. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 432 с.
25. Ильченко М. Е. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов / М.Е.Ильченко, С.Г.Бунин, А.П.Войтер. – К.: Наукова думка, 2003. – 266 с.
26. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.