ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ MANET МЕРЕЖ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Артем БОГУРСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ТСДМ-61
Артем БОГУРСЬКИЙ

Керівник: Михайло МАЛЮЖЕНКО

Рецензент: _____

Київ - 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 Телекомунікації і радіотехніка
Освітньо-професійна програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТСМ
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Богурському Артему Юрійовичу

1.Тема роботи: “Алгоритми побудови та оптимізації MANET мереж”,
керівник роботи Малюженко Михайло Віталійович, доцент кафедри інтернет технологій,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 30.10.2025 року №467.
2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи:
1. Мобільні самоорганізовані мережі (MANET).
2. Алгоритми маршрутизації та оптимізації децентралізованих мереж.
3. Радіотехнічні моделі поширення сигналів.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1. Особливості функціонування мобільних самоорганізованих мереж.
2. Загальні вимоги до побудови та оптимізації децентралізованих мереж.
3. Основні алгоритми маршрутизації та методи підвищення ефективності MANET.
4. Радіотехнічні аспекти забезпечення стійкого зв’язку в мобільних мережах.
5.Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2025	Виконано
2	Аналіз особливостей мобільних самоорганізованих мереж	17.10.2025	Виконано
3	Аналіз алгоритмів та методів оптимізації мереж	31.10.2025	Виконано
4	Побудова універсальної мережевої моделі та практичні рішення	21.11.2025	Виконано
5	Висновки	28.11.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Артем БОГУРСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник
кваліфікаційної роботи _____ Михайло МАЛЮЖЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Богурський А.Ю. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі

на тему: Алгоритми побудови та оптимізації MANET мереж

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Богурський Артем Юрійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Богурського Артема Юрійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Михайло МАЛЮЖЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2025 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Богурський А.Ю.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою
Телекомунікаційні системи та мережі _____ Віктор ЗАЇКА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 107 сторінок, 19 рисунків, 3 таблиці, 26 джерел.

Мета роботи – оптимізація побудови та функціонування MANET-мереж.
Об'єкт дослідження – мобільні самоорганізовані радіомережі.
Предмет дослідження – алгоритми маршрутизації та методи оптимізації MANET.

У роботі наведено узагальнені відомості про мобільні самоорганізовані мережі та проаналізовано особливості їх функціонування в динамічних умовах. Розглянуто сучасні підходи до маршрутизації, методи оптимізації мережевої топології та радіотехнічні аспекти забезпечення стійкого зв'язку. Досліджено вплив середовища, частотних діапазонів і параметрів антен на якість каналу, а також сформовано універсальну модель мережі з урахуванням різних тактичних сценаріїв. Представлено алгоритми оцінювання сигналу, керування напрямком антени та програмні засоби моделювання покриття і вимірювання характеристик антен.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: САМООРГАНІЗОВАНА МЕРЕЖА, MANET, МАРШРУТИЗАЦІЯ, РАДІОПОКРИТТЯ, АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ, ТАКТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ.

Додаток В. 1

Анотація англійською мовою

Для кваліфікаційної магістерської роботи

ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 107 pages, 19 figures, 3 tables, 26 sources.

The purpose of the work is to optimize the construction and functioning of MANET networks.
The object of research is mobile self-organizing radio networks.
The subject of the study is MANET routing algorithms and optimization methods.

The work provides generalized information about mobile self-organizing networks and analyzes the features of their functioning in dynamic conditions. Modern approaches to routing, methods of network topology optimization, and radio engineering aspects of ensuring stable communication are considered. The influence of the environment, frequency ranges, and antenna parameters on channel quality is investigated, and a universal network model is formed taking into account various tactical scenarios. Signal evaluation algorithms, antenna direction control, and software tools for modeling coverage and measuring antenna characteristics are presented.

KEYWORDS: SELF-ORGANIZED NETWORK, MANET, ROUTING, RADIO COVERAGE, OPTIMIZATION ALGORITHM, TACTICAL COMMUNICATION, DIRECTIVITY DIAGRAM.

ЗМІСТ

ВСТУП **8**
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МОБІЛЬНИХ САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖ **11**
1.1. Суть та ключові характеристики мереж без фіксованої інфраструктури 11
1.2. Історія розвитку та еволюція MANET 17
1.3. Типові топології та сфери застосування 22
1.4. Теоретичні можливості децентралізованих мереж 27
1.5. Основні проблеми функціонування у реальних умовах 33
1.6. Фактори, що впливають на стабільність та якість радіозв'язку 38
1.7. Підходи до підвищення ефективності мережі 43
2 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ТА МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ **48**
2.1. Алгоритми маршрутизації та побудови маршрутів 48
2.2. Моделі та методи аналітичної оптимізації 50
2.3. Мурашині алгоритми в оптимізації маршрутів 54
2.4. Оцінювання якості прийнятого сигналу 58
2.5. Алгоритми керування діаграмою спрямованості антен 62
2.6. Алгоритми оцінки маршруту з урахуванням параметрів радіо 66
3 ПОБУДОВА УНІВЕРСАЛЬНОЇ МЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ТА ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ **70**
3.1. Концепція створення комплексної тестової мережі 70
3.2. Основні сценарії застосування 73
3.3. Обґрунтування вибору частот і типів станцій 78
3.4. Формування параметричної таблиці вузлів 80
3.5. Кластеризація побудованої моделі 84
3.6. Структурна схема мережевої конфігурації 87
3.7. Алгоритм оцінювання прийнятого сигналу та керування напрямком антени 90
3.8. Програмний модуль аналізу покриття й розрахунку дальності 95
3.9. Інструмент для вимірювання характеристик антен 99
ВИСНОВКИ **103**
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ **106**

ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасних цифрових технологій, зокрема мобільних радіомереж, призвів до появи широкого спектра систем, що здатні працювати без використання традиційної інфраструктури. У таких системах ключову роль відіграє можливість підтримувати зв’язок між окремими пристроями навіть за умови їх постійного переміщення, непередбачуваних змін навколишнього середовища та нерівномірного розподілу навантаження. Саме тому одним із найбільш актуальних напрямів у галузі телекомунікацій сьогодні є дослідження мобільних самоконфігурованих мереж, здатних створювати структуру взаємодії «на ходу» та адаптуватися до умов, у яких вони працюють.

Особлива увага приділяється мережам, що функціонують без фіксованих опорних станцій та централізованого керування. У таких мережах кожен вузол одночасно виступає і кінцевим пристроєм, і маршрутизатором, що дозволяє будувати гнучкі top-to-top структури. Такі рішення стають критично важливими у ситуаціях, коли розгортання класичних інфраструктурних мереж є неможливим або недоцільним: у зонах надзвичайних ситуацій, під час військових або розвідувальних операцій, у високоризикових умовах, де необхідна надійна комунікація між технічними платформами різного типу.

Попри очевидні переваги, такі системи стикаються з низкою фундаментальних обмежень, пов’язаних як із фізикою поширення радіохвиль, так і з особливостями самої структури мережі. Зміна положення вузлів, поява або зникнення каналів, щільність перешкод, складність середовища (місто, промислова зона, ліс, відкрита місцевість), різна висота антен — усе це впливає на якість зв’язку, пропускну здатність і часові затримки. Зростання кількості вузлів призводить до збільшення обсягу сигналізаційного трафіку, а маршрутизація в умовах постійних змін топології стає нетривіальною задачею. Крім того, значний вплив мають індивідуальні характеристики кожної станції — тип антен, робочий діапазон, потужність передавача та чутливість приймача.

Окремою складовою проблематики є радіотехнічні обмеження, зокрема рівень затухання сигналу, частотозалежні втрати, порушення зони Френеля, а також вплив перешкод і багатопроменевого поширення. Навіть за використання високочутливих приймачів і спрямованих антен канал зв'язку може виявитися нестабільним через затінення, рельєф місцевості або наявність великої кількості рухомих перешкод. Тому розв'язання задачі підвищення стійкості таких мереж потребує не лише застосування оптимізаційних алгоритмів, а й точних розрахунків параметрів радіоканалу для реальних умов роботи.

Для досягнення високої ефективності необхідний комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання, адаптивні алгоритми, аналіз сценаріїв використання та практичну реалізацію елементів мережевої інфраструктури. Одним із ключових етапів є побудова універсальної тестової мережевої моделі, яка включатиме різні категорії вузлів — наземні мобільні платформи, роботизовані комплекси, офісні підсистеми, охоронні вузли, аеростатні ретранслятори, безпілотні апарати та стаціонарні віддалені пункти. Така модель дозволяє всебічно випробувати алгоритми кластеризації, оцінити стабільність зв'язку в різних діапазонах та дослідити роботу радіоканалу в неоднорідних умовах.

Особливу значущість у такій системі має вибір робочих частот і відповідних типів станцій. Кожен сценарій має власні вимоги: одні потребують максимальної дальності, інші — високої пропускної здатності, треті — компактності або малоспоживного обладнання. Наприклад, автомобілі та наземні роботизовані платформи ефективно працюють у L-діапазоні близько 1.3 ГГц, тоді як офісні вузли та охоронні пункти використовують S-band 2.4 ГГц. Аеростатний ретранслятор потребує поєднання UHF і C-band 5.8 ГГц, безпілотники — високочастотного каналу з великою пропускною здатністю, а лінки між віддаленими точками — комбінації UHF і L-band для забезпечення максимальної дальності.

Окремо досліджується задача кластеризації — логічного розбиття складної мережі на групи вузлів із близькими характеристиками або функціями. Це дозволяє зменшити навантаження на маршрутизуючі вузли, оптимізувати маршрути та забезпечити більшу стійкість структури. Для цього використовуються сучасні

алгоритми групування, такі як k-means, DBSCAN та методи на основі рівня прийнятого сигналу. Також у роботі розглянуто можливість використання алгоритму мурашиної колонії для адаптивного вибору оптимальних маршрутів.

Не менш важливою є практична реалізація програмних інструментів, які дозволяють оцінювати якість радіоканалу, визначати максимальну дальність зв'язку, оцінювати параметри сигналу та керувати напрямком антенної системи. У межах роботи розроблено модуль для аналізу покриття, що базується на радіотехнічних формули для різних середовищ, а також інструмент для вимірювання характеристик антен та побудови діаграми їх спрямованості. Такі засоби є необхідними для тестування мережі, оцінки ефективності обладнання та перевірки працездатності запропонованих алгоритмів.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження методів підвищення ефективності мобільних самоорганізованих мереж шляхом застосування кластеризації, адаптивних алгоритмів та радіотехнічних розрахунків, а також створення універсальної тестової моделі, що поєднує різні типи мережевих вузлів і частотних діапазонів. У ході роботи передбачено аналіз теоретичних основ, порівняння сучасних алгоритмів, побудову комплексної мережевої структури та реалізацію програмних модулів для оцінки сигналу й покриття.

Структурно робота складається з трьох розділів. Перший розділ містить аналіз особливостей мобільних самоорганізованих мереж, їх переваг, недоліків та специфічних проблем. У другому розділі розглянуто методи оптимізації та математичні моделі, що застосовуються для аналізу та покращення їх роботи. Третій розділ присвячений практичній реалізації запропонованих рішень, побудові універсальної мережевої моделі, розробці алгоритмів аналізу сигналу та оцінці отриманих результатів.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МОБІЛЬНИХ САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖ

1.1. Суть та ключові характеристики мереж без фіксованої інфраструктури

1.1.1. Поняття самоорганізованої мобільної мережі

Самоорганізована мобільна мережа — це тип бездротової комунікаційної системи, у якій структура зв’язків між вузлами формується динамічно, без заздалегідь визначеної топології та без необхідності у використанні стаціонарної інфраструктури. На відміну від класичних мереж із фіксованими базовими станціями, такі мережі здатні функціонувати у будь-якому середовищі, де присутні хоча б два пристрої, що можуть встановити радіозв’язок. Завдяки цьому вони належать до найбільш гнучких і адаптивних систем зв’язку, які не потребують підготовленої мережевої інфраструктури.

Однією з ключових особливостей таких мереж є те, що кожен їхній вузол поєднує одразу кілька функцій. Кожен пристрій виступає і як передавач, і як приймач, і як маршрутизатор, забезпечуючи передачу даних не лише для себе, а й для інших вузлів. Це дозволяє створювати multi-hop шляхи передачі інформації , завдяки яким мережа охоплює території, що значно перевищують реальний радіус дії окремого вузла. Така здатність особливо важлива для мобільних систем, де пристрої можуть перебувати на значній відстані один від одного або рухатися з різною швидкістю.

Формування мережі відбувається динамічно: при появі нового вузла він автоматично виявляє сусідів, встановлює з ними зв’язок та інтегрується у загальну структуру. У разі виходу вузла з робочої зони мережа також автоматично перебудовується, виключаючи його з маршрутизації. Завдяки такому механізму мережа є живучою та може продовжувати роботу доти, доки залишається хоча б

один можливий шлях передавання даних між потрібними пристроями. Іншими словами, мережа існує не як фіксована структура, а як набір логічних зв’язків, що формуються відповідно до поточних умов.

Важливою характеристикою є повна відсутність централізованого контролера. У самоорганізованих мережах немає єдиного керуючого вузла чи «центру прийняття рішень», від якого залежить робота інших. Усі процеси — від виявлення сусідів до вибору маршрутів і розподілу ресурсів — здійснюються децентралізовано. Такий підхід підвищує стійкість системи до відмов: вихід із ладу будь-якого окремого вузла не призводить до зупинки роботи всієї мережі. Це робить самоорганізовані мережі особливо придатними для використання у складних або непередбачуваних умовах, де надійність та автономність є критично важливими.

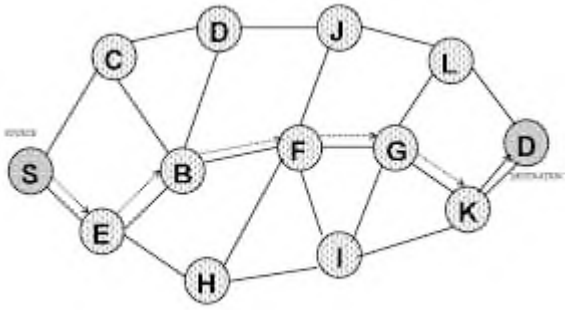


Рис. 1.1 Multi-hop Wireless Network

Узагальнюючи, самоорганізована мобільна мережа — це гнучка, адаптивна і децентралізована система зв’язку, здатна формувати власну структуру без зовнішнього керування та підтримувати взаємодію між мобільними пристроями навіть за повної відсутності фіксованої інфраструктури. Її ефективність визначається здатністю автоматично адаптувати маршрути, підтримувати зв’язність та перебудовувати топологію у відповідь на зміну просторового розташування вузлів або радіотехнічних умов.

1.1.2. Основна ідея самоорганізації

Основна ідея самоорганізованої мобільної мережі полягає у здатності її елементів автономно створювати логічні зв’язки та підтримувати маршрути без будь-якого зовнішнього керування чи попередньо визначеної структури. На відміну від класичних інфраструктурних мереж, де маршрути задаються централізованою системою або побудовані на основі фіксованих базових станцій, у самоорганізованій мережі топологія виникає та змінюється безпосередньо в процесі роботи. Кожен вузол аналізує власне оточення, доступних сусідів та якість каналів, після чого самостійно приймає рішення, з ким встановлювати з’єднання та як передавати дані.

Маршрути в таких мережах формуються автоматично відповідно до поточної топології. Якщо два вузли можуть обмінюватися сигналами безпосередньо, між ними формується прямий канал; якщо ж прямий зв’язок відсутній, інформація передається через проміжні вузли, кожен з яких виконує роль ретранслятора. Завдяки цьому маршрути постійно перебудовуються, що дозволяє мережі залишатися працездатною навіть у випадках, коли частина вузлів виходить із зони зв’язку або змінює своє положення. Механізм автоматичного пошуку шляху забезпечує гнучкість та пристосовуваність структури, роблячи систему живучою та стійкою до динамічних змін.

У процесі роботи кожен вузол самостійно визначає сусідів — інші пристрої, що в даний момент знаходяться у радіусі впевненого прийому. Рішення про встановлення або розрив з’єднання приймається на основі оцінки рівня сигналу, затримки, пропускної здатності та інших параметрів каналу. Цей механізм дозволяє мережі формувати оптимальні локальні структури, з яких потім вибудовується повна маршрутизована топологія. Такий підхід є ключовим для мобільних середовищ, де оточення вузла може змінюватися щосекунди, а кількість сусідів залежить від швидкості руху, типу платформ і характеристик радіоканалу.

Ще однією важливою властивістю самоорганізованих мереж є здатність кожного елемента адаптуватися до змін умов роботи. У реальних сценаріях мережа може працювати в середовищі з різним рівнем радіоперешкод, у зонах з неоднорідним рельєфом або за наявності перешкод, які затіняють сигнал. Вузли

постійно оцінюють якість з’єднань і перебудовують маршрути так, щоб забезпечити найкращі можливі умови для передавання даних. У випадку погіршення якості каналу пристрій може переключитися на іншого сусіда, змінити маршрути або навіть перейти до передачі даних через додаткові проміжні вузли.



Рис. 1.2 Самоорганізована мобільна мережа

Таким чином, самоорганізація в мобільних мережах — це сукупність механізмів, які дозволяють вузлам самостійно визначати оптимальну структуру зв’язків, формувати маршрути та адаптуватися до постійних змін середовища. Завдяки цьому такі системи отримують високу гнучкість, автономність та здатність працювати у складних умовах, де традиційна інфраструктурна мережа була б нестабільною або повністю непридатною.

1.1.3. Децентралізація управління

Однією з фундаментальних властивостей самоорганізованих мобільних мереж є децентралізований принцип управління. На відміну від традиційних телекомунікаційних систем, де існує центральний контролер або базова станція, що координує маршрутизацію, розподіл ресурсів та підтримання структури, у таких мережах відсутній єдиний центр прийняття рішень. Кожен вузол самостійно виконує всі необхідні функції, пов’язані з передаванням і прийманням даних, виявленням сусідів, аналізом доступних маршрутів та адаптацією до змін

мережевих умов. Відсутність централізованого елемента управління забезпечує підвищену стійкість мережі до відмов окремих пристроїв. У разі, коли один або декілька вузлів виходять із ладу, мережа не втрачає працездатність, оскільки її структура не залежить від функціонування конкретного контролера. Замість цього маршрути перебудовуються автоматично, і трафік спрямовується через інші доступні вузли. Така властивість робить децентралізовані мережі придатними для застосування в умовах підвищеної надійності, де непередбачувані збої чи втрати обладнання є типовими.

Крім того, децентралізована модель дозволяє підвищити адаптивність та гнучкість мережі. Оскільки рішення приймаються локально, вузли можуть швидко реагувати на зміни рівня сигналу, радіоперешкоди, переміщення сусідів або зміну топології. Кожен елемент аналізує ситуацію навколо себе та вибирає оптимальний спосіб взаємодії з іншими вузлами, що забезпечує комплексну адаптацію мережі без необхідності у глобальній координації.

Разом із тим децентралізація призводить до виникнення певних труднощів, пов’язаних із синхронізацією та обміном службовою інформацією. У мережах без централізованого контролера кожен вузол повинен регулярно повідомляти про свій стан, доступних сусідів та якість каналів, що створює додатковий сигнальний трафік. У великих мережах це може призвести до перевантаження каналу, зростання затримок або періодичних втрат маршрутної інформації. Проблема ускладнюється тим, що у децентралізованій системі немає механізму глобальної оптимізації, тому локально прийняті рішення не завжди є оптимальними для мережі в цілому. Ще одним викликом є підтримання узгодженості маршрутів. Оскільки кожен вузол приймає автономні рішення, зміни у топології можуть призводити до тимчасових невідповідностей у таблицях маршрутизації. Це викликає короткочасні розриви з’єднань, збільшення затримки або дублювання сигнальних пакетів.

Тобто децентралізація є одночасно ключовою перевагою та важливою складністю самоорганізованих мобільних мереж. Вона забезпечує високу надійність і стійкість до відмов, але вимагає ефективних механізмів локальної

координації, оптимізації службового трафіку та швидкої адаптації до змін мережевої структури.

1.1.4. Властивість динамічності

Однією з найважливіших характеристик самоорганізованих мобільних мереж є їхня динамічність, яка визначає здатність структури мережі змінюватися у часі відповідно до руху вузлів, коливань якості сигналу та змін навколишнього середовища. На відміну від стаціонарних або інфраструктурних систем, де топологія фіксована й передбачувана, у мобільних мережах зв’язки між вузлами можуть виникати, зникати або змінюватися практично щосекунди. Це створює як можливості для адаптації, так і суттєві технічні виклики.

Динамічність проявляється насамперед у постійній зміні топології. У міру руху вузлів змінюється кількість доступних сусідів, якість каналів, дальність зв’язку та наявність прямої видимості. Два вузли можуть мати стабільне з’єднання протягом певного часу, але після переміщення одного з них або появи перешкоди зв’язок може різко погіршитися чи повністю розірватися. Водночас можуть з’явитися нові можливі шляхи передачі через інші вузли, що потребує негайного оновлення маршрутів.

Через такі зміни виникає необхідність у постійній перебудові маршрутів. Система маршрутизації має швидко реагувати на появу або зникнення каналів, вибирати нові оптимальні шляхи передачі та забезпечувати мінімальні затримки при пошуку нових маршрутів. У реальних умовах цей процес може відбуватись десятки разів на хвилину, особливо при високій швидкості руху або великій кількості вузлів. Якщо алгоритми не здатні опрацьовувати зміни достатньо швидко, це призводить до втрати пакетів, зниження пропускної здатності та погіршення загальної якості зв’язку.

Властивість динамічності особливо проявляється в умовах високої мобільності. Для автотранспорту характерні швидкі зміни положення у просторі, для наземних роботизованих комплексів — регулярні переміщення з невеликою

швидкістю та змінною орієнтацією антен, тоді як безпілотні літальні апарати можуть рухатися з високою швидкістю, на значній висоті і змінювати траєкторію практично миттєво. У таких випадках навіть короткочасні зміни положення впливають на можливість прямого зв’язку та призводять до необхідності негайного пошуку нових шляхів передачі даних. Крім того, рухомі платформи можуть створювати додаткові ефекти, пов’язані з багатопроменевістю, зміною поляризації сигналу, доплерівськими зсувами та періодичним затіненням антен елементами конструкції. Це ускладнює підтримання стабільного каналу та потребує використання адаптивних механізмів оцінювання стану радіолінії.

Динамічність є базовою властивістю самоорганізованих мобільних мереж, яка визначає їхню гнучкість, автономність і здатність працювати в умовах змінної структури. Однак ця ж властивість створює значні технічні виклики, пов’язані з необхідністю постійного оновлення маршрутів, швидкої реакції на зміну топології та забезпечення якості зв’язку за високого рівня мобільності.

1.2. Історія розвитку та еволюція MANET

1.2.1. Перші військові дослідження (1970–1990)

Початок розвитку самоорганізованих мобільних мереж припадає на 1970–1990 роки, коли у Сполучених Штатах активно реалізовувалися проєкти, пов’язані з цифровими військовими комунікаціями. Саме в цей період зародилася концепція бездротових пакетних радіомереж, що здатні працювати без фіксованої інфраструктури, а перші експериментальні розробки створили основу для сучасних децентралізованих систем зв’язку.

Одним із ключових гравців у цьому напрямі стала DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) — агентство, відповідальне за ініціювання інноваційних військових технологій. DARPA розпочала дослідження packet radio networks — мереж, у яких інформація передавалась у вигляді окремих пакетів через мобільні

вузли, здатні ретранслювати дані один одному. Ця концепція передбачала створення гнучкої структури зв’язку, що могла б працювати в умовах, де традиційні інфраструктури були недоступними або легко руйнувалися.

Packet radio networks стали першим практичним прикладом системи, де маршрути формувалися динамічно, на основі доступності міжвузлових каналів та якості з’єднання. Передбачалося, що така мережа має працювати навіть у разі виходу з ладу частини вузлів, забезпечуючи стійкість до відмов та можливість продовжувати передавання даних альтернативними шляхами. Ці властивості були критично важливими для військових операцій, де комунікаційна інфраструктура часто піддається ризику або частково знищується.

У рамках перших досліджень з’явилися й перші мобільні маршрутизатори — пристрої, здатні не лише передавати інформацію, а й самостійно визначати маршрути. Це були прототипи сучасних багатофункціональних вузлів, які могли рухатися разом із військовими підрозділами та автоматично змінювати структуру мережі залежно від тактичної ситуації. Саме у цей період було закладено принципи multi-hop передачі, що дозволяють передавати дані через ланцюжок проміжних вузлів, долаючи значні відстані навіть за умов обмеженої потужності передавачів.

Перші польові експерименти довели можливість побудови мережі, яка працює без базових станцій і здатна адаптуватися до руху техніки та особового складу. Було сформовано основні вимоги до таких систем: стійкість до втрат окремих елементів, автономність функціонування, гнучкість маршрутизації та робота в умовах радіоелектронних перешкод.

1.2.2. Формування терміну MANET (1990–2000)

У 1990-х роках концепція мобільних децентралізованих мереж отримала новий імпульс розвитку й почала формуватися як окремий напрям телекомунікаційних технологій. Саме в цей період у науковій літературі з’явився термін MANET (Mobile Ad hoc Network), який означає мобільну мережу, що

виникає «ad hoc» — тобто спонтанно, без попередньої підготовки інфраструктури. Учені та інженери розглядали такі мережі як гнучкий спосіб організації зв'язку у ситуаціях, де використання традиційних систем було неможливим або неефективним.

Це десятиліття ознаменувалося переходом від військових експериментів до ґрунтовних академічних досліджень мобільної передачі даних. Розвиток портативних комп'ютерів, початок ери ноутбуків та появи компактних бездротових радіомодулів створили умови для опрацювання нових підходів до маршрутизації в середовищах зі змінною топологією. З'явилася потреба у протоколах, які могли б функціонувати у мережах зі значною кількістю мобільних вузлів, забезпечуючи при цьому мінімальні затримки та стійкість до розривів каналів.

Саме в цей період були запропоновані перші два фундаментальні протоколи маршрутизації, які стали класичними для MANET і справили значний вплив на подальший розвиток децентралізованих систем: DSR (Dynamic Source Routing) та AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector). DSR будував маршрути на основі джерельного маршрутизаційного підходу, коли повний шлях до пункту призначення зберігається у заголовку пакета. Це дозволяло вузлам легко адаптуватися до розривів маршруту, але водночас збільшувало навантаження у великих мережах через розміри маршрутної інформації. AODV, натомість, використовував таблиці відстаней та формував маршрути лише за потреби, що суттєво зменшувало кількість службових пакетів. Обидва протоколи стали основою для численних пізніших рішень, які використовуються і сьогодні.

Попри те, що дослідження цього періоду носили переважно експериментально-теоретичний характер, саме тоді було сформовано концептуальне бачення MANET як класу мереж зі своїми методами маршрутизації, особливостями функціонування та вимогами до обладнання. Учені окреслили ключові проблеми, зокрема масштабованість, стабільність маршрутів і вплив мобільності на якість з'єднання, задавши напрямок для кількох наступних десятиліть розвитку технологій.

1.2.3. Новий етап розвитку після 2000 року

Початок 2000-х років став точкою переходу мобільних самоорганізованих мереж із частково експериментальної технології у напрям реальних комерційних рішень. Розвиток мікроелектроніки, поява потужніших процесорів із низьким енергоспоживанням і поширення недорогих радіомодулів відкрили можливість створення компактних пристроїв, здатних виконувати складні мережеві алгоритми в польових умовах. Це значно розширило спектр можливих сценаріїв використання мобільних ad hoc мереж поза межами військового сектору.

У цей період на ринку почали з’являтися перші комерційні платформи, які підтримували багатострибкову передачу даних та базові протоколи маршрутизації. До них належали спеціалізовані радіостанції для промислових об’єктів, системи для організації зв’язку під час великих заходів, а також рішення для забезпечення комунікації у важкодоступних районах. Компанії виробляли модулі, які можна було інтегрувати у транспорт, наземні роботизовані платформи й автономні сенсорні станції, що дозволяло швидко розгортати тимчасові мережі для різних задач.

Особливе значення мобільні ad hoc мережі отримали в системах цивільної безпеки. Органи МВС та МНС потребували засобів зв’язку, які могли б працювати у зонах стихійних лих, катастроф або ситуацій, де традиційна інфраструктура виявлялась пошкодженою. Самоорганізовані мережі дозволяли створювати локальні комунікаційні системи для координації рятувальників, обміну відео та телеметрією, передавання даних із мобільних командних пунктів. Такий підхід підвищував швидкість реагування та забезпечував стійкість зв’язку у найскладніших умовах.

Важливо, що в цей період зросла увага до масштабованості та якості сервісу. Дослідники почали розробляти алгоритми, здатні працювати у мережах із великою кількістю вузлів та різними рівнями мобільності. З’явилися протоколи, орієнтовані на підтримку потокового відео, інтелектуальну маршрутизацію та ефективне

використання радіочастотного ресурсу. Саме з цього проміжку почалася ера систем, які могли не просто передавати дані, а забезпечувати повноцінні мережеві сервіси у змінному середовищі.

1.2.4. Гібридні та тактичні системи сучасності

У сучасних умовах мобільні самоорганізовані мережі перетворилися на складні гібридні системи, які поєднують різні типи каналів зв’язку та різнорідні технології. Одним із ключових напрямів розвитку стало інтегрування ad hoc мереж із супутниковими системами. Такий підхід дозволяє поєднати глобальне покриття супутникового каналу зі швидкою локальною взаємодією всередині мобільної групи. У тактичних операціях це дає можливість створювати автономні мережеві сегменти, які можуть передавати критично важливі дані на великі відстані, навіть перебуваючи поза зоною дії наземної інфраструктури.

Гібридні системи також активно інтегруються з технологіями Інтернету речей (IoT). Сучасні сенсорні мережі складаються з великої кількості малопотужних пристроїв, які передають дані про стан техніки, середовища або інфраструктури. Багато таких пристроїв працюють у режимах, де встановлення централізованих точок доступу є недоцільним або складним. Самоорганізовані мережі дають змогу сенсорам обмінюватися інформацією локально, формувати маршрути через найближчих сусідів та забезпечувати стійке покриття на великих територіях.

Окремим напрямом є розвиток систем для робототехніки, автономного транспорту та безпілотних апаратів. Платформи, які працюють у динамічних та непередбачуваних умовах, потребують зв’язку, здатного адаптуватися до змін положення, швидкості та орієнтації. Сучасні MANET-рішення підтримують моделі мобільності високої складності, що дозволяє взаємодіяти групам роботів, наземних комплексів і БПЛА в режимі реального часу. Такі можливості особливо цінні для тактичних підрозділів, пошуково-рятувальних операцій та автономних систем спостереження.

Сьогоднішні гібридні мережі стали значно універсальнішими. Вони підтримують роботу у кількох радіодіапазонах, застосовують адаптивне керування потужністю, використовують алгоритми машинного навчання для прогнозування стану радіоканалу та здатні самостійно оптимізувати маршрути. Завдяки поєднанню із супутниковими каналами, IoT-платформами та сенсорними системами такі мережі перетворилися на інструмент, який можна застосовувати у широкому спектрі тактичних, промислових і цивільних задач.

1.3. Типові топології та сфери застосування

1.3.1. Однорівневі мережі (flat topology)

Однорівнева топологія — це найпростіша й історично перша форма організації мобільних ad hoc мереж, у якій усі вузли мають однаковий статус і функціональні можливості. Кожен елемент виконує однакові ролі: передавання, приймання та маршрутизація даних. У такій структурі не існує виділених центрів керування, спеціалізованих маршрутизаторів чи вузлів із підвищеними повноваженнями. Завдяки цьому мережа залишається максимально рівноправною та симетричною.

Перевагою однорівневого підходу є його простота. Відсутність складної ієрархії зменшує обсяг службових повідомлень, а принцип «кожен вузол сам за себе» дає змогу швидко розгортати мережу без додаткової конфігурації. Такий тип топології є придатним для невеликих або середніх за розміром мереж, у яких кількість вузлів обмежена, а мобільність не створює надто частих змін у структурі.

Разом з тим flat topology має суттєві обмеження, коли мережа починає масштабуватися. Зі збільшенням кількості вузлів зростає кількість маршрутних оновлень, оскільки кожен елемент повинен зберігати інформацію про більшу

частину мережі. Це веде до збільшення службового трафіку, перевантаження радіоканалу та зростання затримок. Прості маршрутизуючі алгоритми, які добре працюють у невеликих групах пристроїв, втрачають ефективність у великих мережах із високою мобільністю.

Проблемою також є нестабільність маршрутів. У мережі без ієрархії кожен вузол однаково важливий, і вихід будь-якого елемента може розірвати кілька маршрутів одночасно, що вимагає оперативної перебудови. Це робить однорівневі мережі чутливішими до динаміки та менш стійкими при великому навантаженні.

Однорівнева топологія залишається важливим концептуальним елементом розвитку мобільних мереж, але на практиці найчастіше використовується у локальних сценаріях, де кількість вузлів обмежена, а вимоги до масштабованості не є критичними.

1.3.2. Ієрархічні топології

Ієрархічні мережі стали логічною відповіддю на обмеження однорівневих структур і забезпечили можливість ефективної роботи у великих та складних мобільних системах. На відміну від flat topology, тут мережа розділяється на логічні групи — кластери, якими керують вузли з підвищеною відповідальністю. Такий підхід дозволяє організувати кращу структурованість і зменшити навантаження на окремі елементи.

Кластери, як правило, формуються на основі просторової близькості, рівня сигналу або функціонального призначення вузлів. Усередині кожного кластера обирається головний вузол (cluster head) — елемент, який бере на себе частину службових функцій: збір інформації про сусідів, оновлення таблиць маршрутизації та організацію міжкластерного обміну. Інколи додатково виділяються вузли-релє (gateway nodes), що забезпечують передавання даних між сусідніми кластерами.

Оскільки головні вузли узагальнюють частину інформації, інші пристрої можуть зменшити обсяг власних службових повідомлень. Це істотно знижує навантаження на радіоканал і робить мережу більш стабільною при зростанні кількості учасників. Ієрархічні структури дозволяють уникнути ситуацій, коли всі вузли без винятку повинні повідомляти одне одного про зміни топології, що є типовою проблемою для однорівневих рішень.

Ще однією перевагою ієрархічних топологій є можливість створення центрів збору даних. У таких системах головні вузли можуть обробляти та агрегувати інформацію до її передавання далі, що зменшує загальний обсяг мережевого трафіку. Це особливо актуально в сенсорних мережах, системах моніторингу чи безпілотних платформах, де велика кількість сирих даних потребує попередньої фільтрації.

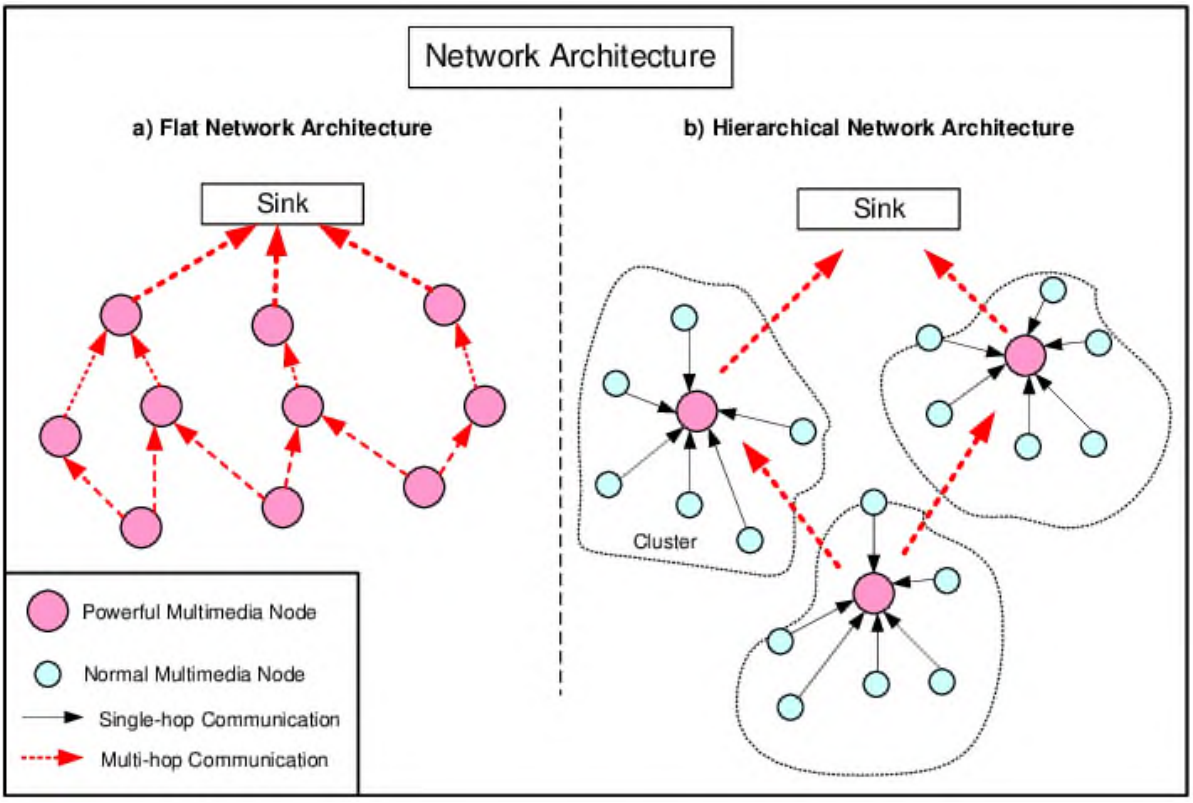


Рис. 1.3 Однорівнева та ієрархічна архітектури

Попри переваги, ієрархічні топології мають і свої виклики. Головні вузли несуть більше навантаження та потенційно можуть стати критичними точками.

Висока мобільність ускладнює стабільність кластерних структур, а заміна ролей між вузлами потребує додаткових алгоритмів.

Проте у великих мережах ієрархічний підхід дозволяє досягти суттєвого виграшу в продуктивності та стійкості, тому такі структури стали базовим компонентом сучасних тактичних і промислових систем.

1.3.4. Застосування

Сфери застосування мобільних самоорганізованих мереж охоплюють широкий спектр задач, де потрібен надійний зв’язок у середовищах без доступу до традиційної інфраструктури. Гнучкість топології, автономність роботи та здатність до швидкої адаптації роблять такі системи придатними для багатьох практичних сценаріїв.

Однією з ключових сфер використання є пошуково-рятувальні операції. Під час ліквідації наслідків стихійних лих, аварій чи техногенних катастроф незрідка виникає ситуація, коли стаціонарні мережі пошкоджені або повністю зруйновані. У таких умовах мобільні ad hoc мережі дають змогу швидко розгорнути локальний зв’язок між рятувальними групами, передавати відео з камер спостереження, координувати дії команд та обмінюватися інформацією про постраждалих. Мережа автоматично перебудовується відповідно до руху персоналу та техніки, забезпечуючи стабільну комунікацію у динамічному середовищі.

Важливою сферою застосування є військові мобільні групи, де необхідний захищений, автономний та живучий зв’язок між підрозділами. Тут самоорганізовані мережі використовуються для координації дій, передавання телеметрії, обміну розвідувальною інформацією, контролю роботизованих систем і взаємодії наземних платформ із повітряними та стаціонарними вузлами. Завдяки відсутності єдиного центру управління такі мережі здатні функціонувати навіть у складних радіоелектронних умовах, при глушінні або втраті окремих вузлів.

Самоорганізовані мережі також знайшли широке застосування у робототехнічних платформах. Групи мобільних роботів, що виконують спільні

задачі, потребують постійної комунікації для обміну даними про навколишнє середовище, координації руху та синхронізації дій. Mesh-топологія, характерна для таких мереж, дозволяє роботам утримувати зв’язок навіть при зміні положення, а багатострибкові маршрути забезпечують передачу інформації між платформами, що працюють на великій площі або у складних умовах.

Окрему категорію становлять безпілотні літальні апарати, які можуть виступати як автономні вузли або як ретранслятори для розширення зони покриття. БПЛА забезпечують передачу даних у ситуаціях, коли наземні вузли розділені рельєфом, будівлями або великою відстанню. Висока мобільність БПЛА дозволяє оперативно формувати нові маршрути, підтримувати зв’язок між групами наземних пристроїв або створювати тимчасові повітряні канали для критичних операцій.

Ще одним важливим напрямом є тимчасові пункти зв’язку, які встановлюються під час проведення великих заходів, польових робіт, будівництва чи технічних операцій. У таких умовах використання традиційних мереж є економічно недоцільним або технічно складним. Самоорганізовані системи дають можливість швидко розгорнути комунікаційну інфраструктуру у місцях, де відсутні дротові або стаціонарні бездротові канали. Це дає змогу підтримувати роботу персоналу, забезпечувати доступ до сервісів і обмінюватися даними без значних витрат.

Завдяки своїй гнучкості, автономності та здатності до адаптації мобільні ad hoc мережі стали універсальним інструментом, який використовується у найрізноманітніших галузях — від безпеки та оборони до цивільних і промислових застосувань.

1.4. Теоретичні можливості децентралізованих мереж

1.4.1. Межі пропускної здатності

Одним із ключових аспектів теоретичного аналізу мобільних самоорганізованих мереж є вивчення меж їх пропускної здатності. На відміну від інфраструктурних систем, де кожен вузол під'єднаний до централізованої точки доступу, у децентралізованих мережах навантаження на канал розподіляється між усіма учасниками. Це створює специфічні обмеження, які були детально описані в класичній теоремі Гупти–Кумара, що стала фундаментом для багато років подальших досліджень.

У своїй роботі Гупта і Кумар показали, що теоретична пропускна здатність кожного окремого вузла в багатострибковій мобільній мережі знижується непропорційно швидко зі збільшенням кількості учасників. Головний висновок теореми полягає в тому, що загальна пропускна здатність мережі не зростає лінійно з числом вузлів. Навпаки, при збільшенні кількості пристроїв середня пропускна здатність одного вузла падає приблизно як $1/\sqrt{N}$, де N — кількість вузлів у системі.

Таке падіння пропускної здатності пов'язане з тим, що в багатострибкових маршрутах передавання кожного пакета займає канал у всіх проміжних вузлах, і загальний обсяг трафіку зростає швидше, ніж можливість системи його обробити. Крім того, збільшення кількості учасників призводить до зростання службового трафіку: вузли повинні регулярно обмінюватися інформацією про сусідів, доступні маршрути та стан каналів. Це додаткове навантаження поглинає частину пропускної здатності, обмежуючи ефективність реальних мереж.

Важливим наслідком теореми Гупти–Кумара є те, що масштабованість мобільних ad hoc мереж обмежена фізичними законами радіопередачі. Навіть при ідеальних умовах і відсутності перешкод суттєве збільшення числа вузлів природним чином веде до погіршення продуктивності. Тому сучасні протоколи часто використовують кластеризацію, розширення радіочастотних діапазонів або гібридну архітектуру для зменшення надмірного навантаження і підвищення ефективності системи.

1.4.2. Теоретична затримка

Затримка (latency) є одним із визначальних параметрів для мобільних самоорганізованих мереж, особливо в умовах високої мобільності та динамічної зміни топології. На відміну від стаціонарних систем, де час доставки пакетів залежить здебільшого від навантаження на канал і маршрутизатори, у мобільних мережах затримка формується з урахуванням кількох додаткових факторів, пов’язаних із рухом вузлів і перебудовою структури.

Одним із головних чинників, що впливають на latency, є динамічність мережі. Рух вузлів змінює якість зв’язку, набір доступних сусідів і можливість підтримання маршруту. Навіть незначне зміщення пристрою може спричинити різке погіршення сигналу та необхідність пошуку нового шляху. У таких випадках затримка виростає за рахунок часу, необхідного для виявлення розриву, вибору альтернативного маршруту та перевірки його працездатності.

Істотну роль відіграє також час перебудови маршрутів, який залежить від типу протоколу. Реактивні протоколи, такі як AODV або DSR, шукають маршрут лише за потреби, що дозволяє зменшити службовий трафік, але збільшує затримку в моменти, коли шлях потрібно знайти заново. Проактивні протоколи, навпаки, підтримують таблиці маршрутів у постійно актуальному стані, однак це вимагає додаткового обміну службовими пакетами та не завжди забезпечує швидку реакцію на раптові зміни.

У реальних умовах затримка може змінюватися нерівномірно та непередбачувано. На неї впливають перешкоди, зміна середовища, коливання навантаження, відстань між проміжними вузлами, а також обмеження енергоспоживання. Для рухомих платформ, таких як транспортні засоби, безпілотники та роботизовані комплекси, затримка може суттєво варіюватися залежно від швидкості переміщення або організації маршрутизації в конкретному сегменті.

Теоретичний аналіз затримки дозволив сформувати уявлення про те, що забезпечення низького latency у мобільних самоорганізованих мережах є складним завданням, яке потребує оптимізації алгоритмів, адаптації до руху та використання методів прогнозування стану радіоканалу.

1.4.3. Маршрутизація у децентралізованих мережах

Маршрутизація є ключовим механізмом, що визначає ефективність роботи мобільних самоорганізованих мереж. В умовах децентралізації та постійних змін топології маршрути повинні формуватися на основі локальної інформації, швидко адаптуватися до розривів каналів і забезпечувати стійкість передавання даних незалежно від рівня мобільності вузлів. На відміну від інфраструктурних систем, де маршрутизація здійснюється через централізований сервер або базову станцію, у takich мережах кожен вузол бере участь у прийнятті рішень щодо шляху передавання, що формує три основні класи маршрутизуючих підходів: реактивні, проактивні та гібридні протоколи.

Реактивні протоколи (on-demand), такі як AODV або DSR, виконують пошук маршруту лише тоді, коли вузлу дійсно потрібно передати дані до певного призначення. Це дозволяє економити ресурси та зменшити службовий трафік у періоди низької активності. Маршрут запитується за допомогою спеціальних повідомлень, які поширюються мережею до моменту знаходження цільового вузла або побудови шляху через доступні проміжні точки. Реактивний підхід добре працює в умовах середньої та високої мобільності, однак створює додаткові затримки під час відкриття маршруту, що може позначатися на якості сервісу в системах реального часу.

Проактивні протоколи (table-driven), навпаки, підтримують актуальні таблиці маршрутів постійно. Вузли періодично обмінюються службовою інформацією, оновлюючи маршрути незалежно від того, чи передається в цей момент корисний трафік. Представниками цього класу є OLSR, DSDV та інші протоколи, які забезпечують швидке та передбачуване передавання, оскільки необхідний маршрут уже зберігається в таблиці. Проте така стратегія підвищує сигнальне навантаження та може стати причиною перевантаження каналу при великій кількості вузлів або високій частоті змін у топології.

Гібридні протоколи поєднують підходи двох попередніх класів. Найвідомішим прикладом є ZRP (Zone Routing Protocol), який використовує проактивну маршрутизацію в межах локальної зони та реактивні механізми для передавання даних за її межі. Такий підхід дозволяє скоротити кількість службових пакетів, водночас забезпечуючи доступність маршрутів у найближчому оточенні. Гібридні рішення особливо корисні в мережах із неоднорідною мобільністю, коли деякі вузли є практично статичними, а інші рухаються з високою швидкістю.

Однією з основних проблем маршрутизації у децентралізованих мережах є надлишковий службовий трафік, що виникає через необхідність постійного оновлення інформації про топологію. У великих системах кожне службове повідомлення мультиплікується між вузлами, створюючи значне навантаження на канал. Це не лише знижує доступну пропускну здатність для корисного трафіку, а й може спричинити затримки, колізії або фрагментацію маршрутизуючих механізмів.

Додаткові труднощі виникають у ситуаціях, коли мережа зазнає різких змін через мобільність або зовнішні перешкоди. У такі моменти протоколи можуть генерувати велику кількість маршрутних оновлень, і це ще більше збільшує службовий трафік. Тому сучасні підходи до маршрутизації орієнтовані на зменшення обсягу сигнальних повідомлень, оптимізацію їх розповсюдження та підтримання актуальності маршрутів із мінімальними витратами.

1.4.4. Умови існування зв’язності

Для мобільних самоорганізованих мереж важливим є не лише вибір маршрутизуючих алгоритмів чи частотного діапазону, а й базові умови, за яких мережа взагалі здатна забезпечити зв’язність. Під зв’язністю розуміють можливість будь-якій парі вузлів обмінятися даними — безпосередньо або через проміжні елементи. Це фундаментальна властивість, що визначає життєздатність мережі та можливість побудови маршрутів у реальних умовах. На зв’язність впливають три

ключові групи факторів: щільність вузлів, радіус дії передавачів і ймовірнісний характер радіоканалу.

Одним із визначальних параметрів є щільність вузлів. Мережа повинна містити достатню кількість пристроїв у межах площі покриття, щоб між кожним вузлом існувала хоча б одна ланка зв’язку. Якщо щільність надто низька, мережа починає «розриватися» на окремі фрагменти, між якими неможливо передати інформацію. Теоретичні моделі демонструють, що існує порогове значення щільності, при якому ймовірність утворення зв’язної мережі різко зростає. Цей поріг залежить від радіусу дії, середовища поширення сигналу та характеру мобільності. Для динамічних мереж із нерівномірним розподілом вузлів потрібна вища щільність, ніж для статичних систем.

Другим важливим чинником є радіус дії. Дальність зв’язку між окремими вузлами визначається потужністю передавача, чутливістю приймача, характеристиками антени та умовами поширення сигналу. У мобільних мережах, особливо в міських або лісових середовищах, радіус дії часто відрізняється від номінального значення через перешкоди, затінення й багатопроменевість. Зменшення ефективного радіусу призводить до зростання вимог до щільності вузлів і збільшує ймовірність втрати зв’язності. Навпаки, використання антен із більшим коефіцієнтом підсилення або підвищеної потужності може частково компенсувати недоліки середовища, однак це не завжди можливо з огляду на енергоспоживання та регуляторні обмеження.

Третю групу умов формують ймовірнісні моделі зв’язку, що відображають фізичні властивості радіоканалу. На практиці наявність або відсутність зв’язку між двома вузлами не є жорстко детермінованою величиною. На якість сигналу впливають флуктуації рівня потужності, fading, зміни у середовищі, рух об'єктів і випадкові перешкоди. Тому для аналізу зв’язності використовують ймовірнісні підходи: графи випадкових геометричних мереж, моделі з випадковим радіусом дії, лог-нормальні моделі затухання та інші методи, які відображають непередбачуваність реального радіоканалу. Завдяки цьому можна оцінити ймовірність утворення зв’язної мережі за певних параметрів.

У сукупності ці чинники визначають, чи буде мережа працювати як єдине ціле, чи розпадеться на незалежні сегменти. Для практичних систем важливим є забезпечення такого поєднання щільності вузлів, радіусу дії та характеристик каналу, яке дозволить підтримувати зв’язність навіть за умов високої мобільності та динамічної зміни топології. Саме тому сучасні проєкти розгортання мобільних мереж орієнтуються на адаптивні механізми розподілу потужності, кластеризацію та використання багатодіапазонного обладнання — ці підходи збільшують шанси зберегти зв’язність у складних і непередбачуваних умовах.

1.5. Основні проблеми функціонування у реальних умовах

1.5.1. Завади та багатопроменевість

Одним із головних викликів у роботі мобільних самоорганізованих мереж є вплив радіозавад та багатопроменевого поширення сигналу. На відміну від умов лабораторного середовища, у реальних просторах хвиля проходить складну траєкторію, взаємодіючи з великою кількістю об’єктів. Це створює різноманітні прояви: відбиття, дифракцію, поглинання та затінення, які суттєво змінюють рівень сигналу та його стабільність.

Відбиття виникає тоді, коли радіохвиля стикається з поверхнею — стіною, фасадом будівлі, автомобілем чи металевою конструкцією — і частково повертається назад або змінює напрямок. У міських умовах кількість таких поверхонь велика, що призводить до появи множини відбитих компонент сигналу.

Дифракція дозволяє хвилі огинати перешкоди, але при цьому супроводжується втратою енергії. Вона є важливою у середовищах, де пряма видимість часто порушується елементами рельєфу або інженерними конструкціями.

Затінення виникає, коли між вузлами опиняється масивний об’єкт, який частково або повністю блокує хвилю. У таких випадках рівень сигналу може

знизитися на десятки децибелів, що призводить до нестабільності каналів та частих розривів маршруту.

Вплив середовища є критичним чинником. У міських зонах домінує багатопроменевість: через відбиття та дифракцію сигнал приходить до приймача різними шляхами та з різними затримками. Це спричиняє явище інтерференції, коли окремі компоненти сигналу підсилюють або послаблюють одна одну. У лісовій місцевості значну роль відіграють поглинання та розсіювання сигналу рослинністю; у дощову або вологу погоду ці ефекти зростають. Промислові райони додають велике число металевих структур, які створюють стохастичні відбиття та нестабільні зони покриття.

Багатопроменевість і завади ускладнюють роботу маршрутизуючих протоколів, оскільки якість каналу змінюється непередбачувано. Вузли можуть бачити одне одного нестабільно, що призводить до частих змін у таблицях маршрутів. Це збільшує службовий трафік і створює ризики для затримки та пропускної здатності. У реальних системах для боротьби з цими ефектами застосовують спрямовані антени, адаптивне регулювання потужності, фільтрацію каналів та оцінювання якості сигналу в реальному часі.

1.5.2. Перевантаження ключових вузлів

У децентралізованих мобільних мережах існує проблема нерівномірного розподілу навантаження між вузлами. Хоча всі елементи формально мають однаковий статус, у практичних сценаріях деякі з них опиняються у критичних точках структури і пропускають через себе значно більше трафіку. Такі вузли стають локальними центрами навантаження, що може спричинити затримки, втрати пакетів та зниження загальної продуктивності мережі.

Одним із характерних проявів цього явища є ефект bottleneck, коли окремий вузол змушений обробляти непропорційно великий обсяг транзитного трафіку. Це відбувається тоді, коли геометрична конфігурація мережі або характеристики середовища створюють ситуацію, у якій саме через цей вузол проходить основна

частина маршрутів. У разі збільшення кількості сусідів або потоку даних вузол може перевантажитися — його обчислювальні ресурси та радіоканал стають вузьким «горлечком» системи.

Іншим проявом є проблема “гарячих точок” (hot spots). Це вузли або ділянки мережі, що опиняються у центрі активності через специфіку застосування. Наприклад, вузол, що забезпечує зв’язок між двома кластерами, автоматично стає критичним елементом маршрутизації. Якщо до нього додаються додаткові функції — передавання відео, телеметрії чи обмін командними даними — навантаження може зрости настільки, що саме цей елемент стане причиною зниження загальної ефективності мережі.

Перевантаження ключових вузлів має низку негативних наслідків. Зростає кількість перетрансмісій, збільшується latency, зменшується пропускна здатність каналів, а інколи виникають розриви маршрутів. Також перевантажені вузли швидше витрачають енергію, що є критичним у батарейних системах — роботах, автономних сенсорах, БПЛА.

Для зниження впливу цих явищ використовують кластеризацію, розподіл маршрутів між альтернативними шляхами, балансування навантаження та аналіз топології в реальному часі. Також застосовують методи прогнозування, які дозволяють визначити потенційні гарячі точки ще до їх перевантаження і змінити структуру мережі завчасно.

1.5.3. Нестабільність маршрутів

Нестабільність маршрутів є одним із найбільш характерних і складних викликів у мобільних самоорганізованих мережах. Через високу динамічність топології маршрути, які ще кілька секунд тому були придатними для передавання даних, можуть раптово втратити актуальність. Це створює значне навантаження на маршрутизуючі протоколи та впливає на ключові показники продуктивності: затримку, втрати пакетів і пропускну здатність.

Однією з основних причин нестабільності є постійні розриви каналів. Навіть при низькій швидкості руху вузлів зміна їх взаємного розташування може призвести до виходу із зони покриття або порушення прямої видимості. У середовищах із великою кількістю перешкод канал може розриватися навіть при незначному переміщенні антени чи зміні орієнтації платформи. У практичних сценаріях — наприклад, для мобільних роботів або БПЛА — такі розриви відбуваються регулярно і непередбачувано, що потребує від протоколів маршрутизації здатності реагувати негайно.

Ще одним фактором є плаваюча якість каналу, яка відображає стохастичну природу радіопоширення. Рівень сигналу може коливатися через багатопроменевість, флуктуації потужності, рух перешкод або зміни у частотному середовищі. Канал може бути стабільним, але за лічені секунди перейти в режим, непридатний для передавання даних, навіть якщо відстань між вузлами не змінилася. У таких випадках маршрутизатор вимушений шукати альтернативні шляхи або повторно передавати пакети, що збільшує затримку і генерує додатковий службовий трафік.

Для мереж, що працюють у складних або мобільних середовищах, нестабільність маршрутів є основним фактором, що обмежує продуктивність. Сучасні протоколи намагаються мінімізувати її вплив за допомогою прогнозування якості каналу, зважування маршрутів за надійністю, використання резервних шляхів і адаптації параметрів передавання. Проте навіть із такими механізмами цілковито усунути нестабільність неможливо через фізичну природу радіоканалу.

1.5.4. Енергетичні обмеження

Енергоспоживання є критичним чинником для значної частини мобільних самоорганізованих мереж, особливо коли вузли працюють на акумуляторах або іншому автономному живленні. Обмеження енергії впливають не лише на тривалість роботи окремого пристрою, а й на загальну працездатність мережі, оскільки вихід із ладу одного елемента може порушити важливі маршрути.

Особливо гостро проблема проявляється у БПЛА та роботизованих платформах. Для безпілотників енергоспоживання радіомодуля конкурує з енергоспоживанням двигунів, навігаційних систем та обчислювальних блоків. У таких системах навіть незначне збільшення потужності передавача або частоти передачі пакетів може суттєво зменшити тривалість польоту. Для наземних роботів важливо оптимізувати енергетику так, щоб комунікаційна підсистема не створювала додаткове навантаження на акумулятор під час інтенсивного виконання задач.

Енергетичні обмеження впливають і на вибір протоколів маршрутизації. Активні підходи, які вимагають періодичного оновлення маршрутів, можуть споживати більше енергії через постійний обмін службовими повідомленнями. Реактивні протоколи, навпаки, зменшують кількість оновлень, але створюють пікове навантаження при відкритті маршруту. У системах із обмеженими ресурсами ці компроміси стають критичними, і необхідно балансувати між стабільністю, затримкою та енерговитратами.

Сучасні дослідження спрямовані на розробку енергоефективних алгоритмів маршрутизації, адаптивного керування потужністю передавача, динамічного вибору частоти та застосування режимів глибокого сну для неактивних вузлів. У реальних системах енергетичні обмеження часто визначають архітектуру всієї мережі і стають одним із основних критеріїв при виборі обладнання.

1.5.5. Масштабування та службовий трафік

Масштабування є однією з головних проблем мобільних самоорганізованих мереж, оскільки зі збільшенням кількості вузлів зростає обсяг службових даних, необхідних для підтримання маршрутизації. У великих мережах кожен новий елемент додає не лише корисний трафік, а й збільшує кількість сигналізаційних повідомлень, які розсилаються для оновлення інформації про сусідів і структуру топології.

Одним із ключових проявів проблеми масштабування є оверход маршрутних протоколів. У проактивних протоколах кожен вузол регулярно передає оновлення таблиць маршрутів, що створює значний фоновий трафік. У реактивних протоколах при пошуку маршруту надсилається велика кількість broadcast-пакетів, які можуть перевантажувати мережу при високій густоті вузлів. У гібридних рішеннях ці два підходи поєднуються, але загальний обсяг службового трафіку все одно суттєво залежить від розміру системи.

Іншим фактором є збільшення кількості сигнальних пакетів при рості мережі. У децентралізованих умовах кожен вузол повинен знати про появу або зникнення сусідів, зміни у каналі, доступність нових маршрутів та інші події. Коли кількість вузлів зростає десятками або сотнями, службовий трафік може почати конкурувати з корисними даними за пропускну здатність каналу. Це призводить до зниження продуктивності, збільшення затримок та ризику циклічних перевантажень.

Проблема масштабування ускладнюється тим, що маршрутизаційні повідомлення часто передаються у широкомовному режимі, що додатково навантажує мережу. Сучасні методи вирішення включають кластеризацію, обмеження областей поширення службових пакетів, використання багатодіапазонних систем та створення ієрархічних структур.

Масштабування та службовий трафік залишаються ключовими факторами, що визначають межі практичного застосування мобільних ad hoc мереж і мотивують розробку нових поколінь протоколів, орієнтованих на роботу в складних динамічних умовах.

1.6. Фактори, що впливають на стабільність та якість радіозв’язку

1.6.1. Висота розміщення антен

Висота розміщення антени є одним із найважливіших параметрів, які визначають дальність та стабільність радіозв’язку в мобільних самоорганізованих

мережах. Зі збільшенням висоти зменшується вплив перешкод, рельєфу та локальних об’єктів, що поглинають або відбивають сигнал. У відкритих умовах збільшення висоти навіть на кілька метрів може призвести до суттєвого зниження затухання та розширення області покриття.



Рис. 1.4 Поширення сигналу

Для наземних вузлів критичним фактором є те, що низьке розташування антени підсилює ефект поверхневих втрат і збільшує кількість перепон між передавачем і приймачем. У міських умовах висота особливо важлива, оскільки сигнал може блокуватися будівлями, транспортом і металевими конструкціями. Підняття антени над рівнем міських перешкод різко покращує шанс отримання стабільного каналу.

Для мобільних платформ, таких як БПЛА, висота антени визначає не лише дальність, а й характер поширення хвилі. На великих висотах зменшується кількість відбиттів, тому зв’язок стає більш передбачуваним, а зона покриття — ширшою. Наземні вузли отримують можливість працювати через повітряний ретранслятор, навіть якщо між ними немає прямої видимості.

У практичних системах висоту антени враховують на етапі радіопланування, оскільки вона безпосередньо впливає на енергетичний баланс лінії, зону Френеля та доступну потужність сигналу.

1.6.2. Тип середовища

Середовище поширення радіохвиль визначає форму, інтенсивність і характеристику сигналу, що доходить до приймача. В умовах мобільних ad hoc мереж середовище постійно змінюється, тому важливо враховувати різні його типи: відкриті поля (field), міські зони (urban), щільну забудову або густий ліс (dense/forest).

У відкритому середовищі втрати здебільшого визначаються законом вільного простору, що забезпечує найбільш передбачувану модель поширення. У міській місцевості ситуація змінюється: велика кількість будівель, конструкцій та рухомих об’єктів створюють багатопроменеві ефекти, які викликають флуктуації сигналу і зменшують дальність зв’язку.

У лісових умовах хвиля поглинається рослинністю — листям, корінням, стовбурами дерев. Вологість повітря і рослин також суттєво впливають на затухання. У густих лісах або промислових районах коефіцієнти ослаблення можуть бути в кілька разів більшими, ніж у відкритій місцевості.

Для коректного прогнозування дальності використовуються корекційні коефіцієнти, які враховують тип середовища. Наприклад, моделі Okumura–Hata, ITU-R або COST-231 дозволяють оцінити затухання залежно від частоти, висот антен і характеристик місцевості. У мобільних ad hoc мережах врахування середовища є ключовим, оскільки топологія формується не заздалегідь, а в реальному часі.

1.6.3. Потужність передавача

Потужність передавача визначає початковий рівень сигналу, від якого залежить здатність системи забезпечувати зв’язок на заданій відстані. Збільшення потужності дозволяє подолати частину втрат у середовищі, проте її роль обмежена фізичними та регуляторними обмеженнями.

Ключовим параметром є SNR (Signal-to-Noise Ratio) — співвідношення між потужністю сигналу і шумом у приймачі. Чим більший SNR, тим стабільнішим буде зв’язок, і тим меншою є ймовірність помилок при декодуванні. Для різних

типів модуляції існують порогові значення SNR, нижче яких зв’язок стає нестабільним або повністю непридатним.

Іншим важливим параметром є fade margin — запас рівня сигналу, що забезпечує стійкість лінії у разі короткочасних флуктуацій. У мобільних системах, де fading є невід’ємною частиною середовища, правильний fade margin дозволяє зменшити кількість розривів і повторних передавань.

Потужність передавача також впливає на енергоспоживання. Для БПЛА й роботів навіть невелике збільшення потужності може суттєво скоротити час автономної роботи, тому режими передавання часто адаптивні та залежать від якості каналу.

1.6.4. Зона Френеля

Зона Френеля визначає об’єм простору між передавачем і приймачем, у межах якого перешкоди можуть суттєво впливати на рівень сигналу. Навіть коли між вузлами є пряма видимість, часткове перекриття зони Френеля може призвести до додаткових втрат або інтерференції.

Радіо планування враховує радіус першої зони Френеля, який залежить від частоти сигналу та відстані між вузлами. Для низьких частот зона більша, що робить їх менш чутливими до перешкод у безпосередній близькості. Для високих частот — навпаки, зона мала, і навіть невеликий об’єкт у ній може погіршити зв’язок.

Важливою умовою стабільного каналу є чистота зони Френеля, тобто відсутність значних перешкод у її межах. Це особливо актуально в міських умовах, де будівлі, техніка й інші об'єкти легко можуть її порушити. У лісових районах зона Френеля часто перекривається деревами — це призводить до нерівномірного затухання та нестабільного каналу.

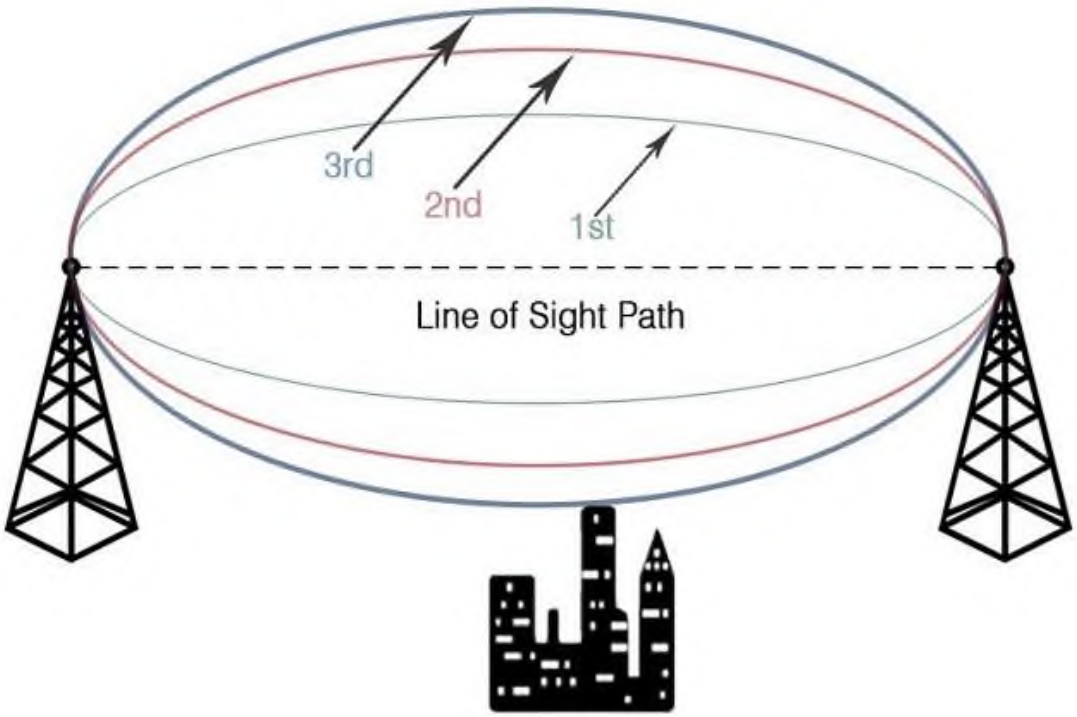


Рис. 1.5 Зони френеля

У мобільних мережах заздалегідь забезпечити чистоту зони Френеля неможливо, тому системи компенсації та адаптивні алгоритми є необхідною частиною їхньої роботи.

1.6.5. Особливості антен

Антени відіграють ключову роль у формуванні характеристик радіоканалу. Їх параметри — коефіцієнт підсилення, ширина променя і поляризація — визначають ефективність випромінювання та приймання сигналу.

Коефіцієнт підсилення відображає здатність антени концентрувати енергію в певному напрямку. Високий коефіцієнт дозволяє збільшити дальність зв’язку без підвищення потужності передавача, але потребує точного наведення. Для мобільних вузлів часто застосовують антени середнього підсилення або всеспрямовані — вони менш чутливі до руху та орієнтації.

Ширина променя визначає, наскільки вузько або широко антена випромінює сигнал. Широкий промінь забезпечує стабільний зв’язок у динамічних умовах, але зменшує ефективну дальність. Натомість вузькоспрямовані антени забезпечують кращий SNR, проте потребують стабільного положення або механізму відстеження напрямку — як у поворотних антенних системах БПЛА чи наземних станцій.

Поляризація також впливає на рівень сигналу. Невідповідність поляризацій між передавачем і приймачем може зменшити SNR на 20–30 дБ. У мобільних системах часто використовують вертикальну або кругову поляризацію для підвищення стійкості зв’язку при зміні орієнтації платформи.

Антенні характеристики визначають форму зони покриття, рівень завадостійкості та здатність мережі підтримувати стабільні маршрути у динамічному середовищі.

1.7. Підходи до підвищення ефективності мережі

1.7.1. Кластеризація

Кластеризація є одним із найбільш ефективних способів оптимізації роботи мобільних самоорганізованих мереж. Суть підходу полягає у розбитті великої мережі на менші логічні групи — кластери, кожен із яких має власний вузол-координатор або «cluster head». Така структура дозволяє зменшити загальне навантаження на маршрутизуючі протоколи, оптимізувати службовий трафік і підвищити масштабованість системи.

У звичайній децентралізованій мережі кожен вузол повинен обмінюватися інформацією про сусідів і маршрути, що створює значний сигнальний трафік. Кластеризація дозволяє обмежити обсяг службових повідомлень межами кожного кластера. Вузли всередині кластера взаємодіють між собою без необхідності повідомляти про зміни всій мережі. Лише вузли-координатори відповідають за обмін інформацією між кластерами, що суттєво знижує навантаження.

Крім зменшення службового трафіку, кластеризація покращує структуру мережі. Кластери можуть бути сформовані за географічним розташуванням, рівнем мобільності, енергетичними ресурсами або роллю вузлів. Наприклад, у системах із БПЛА кластеризація дозволяє виділяти групи повітряних платформ і групи наземних роботів так, щоб не перевантажувати єдиний маршрутний граф.

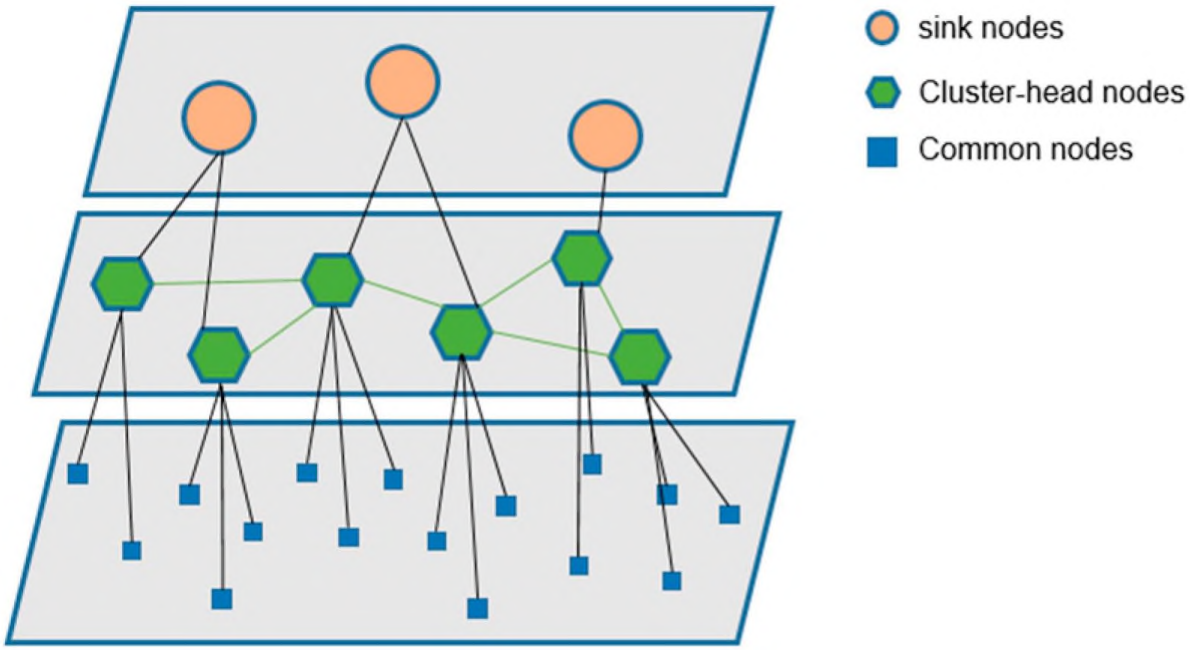


Рис. 1.6 Приклад кластеризації мережі

Такий підхід полегшує управління мережею, дозволяє вводити пріоритети, підвищує стійкість до відмов та допомагає уникати перевантаження окремих вузлів. Кластерні структури лежать в основі багатьох сучасних протоколів, орієнтованих на роботу у великих та динамічних мережах.

1.7.2. Адаптивне керування потужністю

Адаптивне керування потужністю передавача є ключовою технологією для оптимізації енергоспоживання та зменшення взаємних завад у мобільних мережах. Ідея полягає в тому, що вузол передає з тією потужністю, яка необхідна для підтримання зв’язку, але не більшою. Це дає можливість зменшити інтерференцію для сусідніх каналів і одночасно продовжити автономну роботу пристроїв.

У традиційних мережах часто використовується фіксована потужність передавача, що призводить до надмірних втрат енергії в умовах, коли вузли знаходяться близько один до одного. Адаптивні системи, навпаки, оцінюють якість каналу — рівень RSSI, SINR або BER — і динамічно регулюють потужність. У разі добрих умов сигналу потужність зменшується, що мінімізує завади для інших учасників мережі.

Економія енергоресурсів є особливо важливою для БПЛА, роботів, сенсорних вузлів та портативних станцій. Зменшення потужності навіть на кілька децибелів може суттєво подовжити час роботи мережі або автономність польоту безпілотника. Крім того, адаптивне регулювання дозволяє уникати ситуацій, коли високопотужний вузол «затирає» слабкі сигнали від інших пристроїв, погіршуючи загальну пропускну здатність.

У сучасних протоколах адаптивне керування потужністю застосовується разом із кластеризацією, вибором оптимальних маршрутів та механізмами уникнення завад.

1.7.3. Оцінювання рівня сигналу

Оцінювання рівня сигналу є центральним механізмом у роботі багатьох алгоритмів оптимізації мобільних мереж. Метрики RSSI (Received Signal Strength Indicator) і SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) використовуються для прогнозування якості каналу, визначення наявності зв’язку та вибору найстабільніших маршрутів.

RSSI відображає інтенсивність сигналу, що надходить до приймача, і є одним із базових параметрів для аналізу доступної дальності. У системах, де вузли переміщуються, RSSI дозволяє оцінити, наскільки швидко погіршується або покращується зв’язок при зміні відстані або орієнтації антени.

SINR враховує не лише корисний сигнал, а й рівень завад і шуму. Ця метрика є набагато інформативнішою в умовах багатопроменевості та великої кількості

одночасних передавачів. Для стійкого зв’язку SINR має перевищувати поріг, визначений типом модуляції та шириною каналу.

Ретельне оцінювання рівня сигналу дозволяє системі прогнозувати зону покриття та приймати рішення про перемикання маршрутів або зміну потужності. Наприклад, якщо SINR починає поступово знижуватися, вузол може ініціювати пошук нового маршруту ще до того, як канал стане непридатним. Це підвищує стабільність мережі та зменшує кількість розривів.

1.7.4. Обчислення оптимальних маршрутів

Пошук оптимального маршруту в мобільній мережі потребує врахування багатьох факторів: якості каналу, відстані між вузлами, мобільності, навантаження та енергетичних обмежень. Одним із сучасних підходів до вирішення цієї задачі є використання ACO (Ant Colony Optimization) — мурашиного алгоритму.

ACO базується на поведінці колоній мурах, які залишають феромонні сліди на шляху до джерел їжі. У радіомережах аналог феромону використовується для позначення якісних маршрутів. Чим стабільніший і швидший шлях, тим більша «вага» його феромону. У процесі маршрутизації нові вузли мають більшу ймовірність обирати саме ті маршрути, які виявилися найефективнішими в попередніх ітераціях. Цей підхід дозволяє знаходити маршрути з мінімальною затримкою, уникати перевантажених вузлів, підлаштовуватися під зміни топології, підтримувати баланс між стабільністю і швидкістю.

Крім ACO, використовуються протоколи з пріоритезацією: вони враховують важливість трафіку. Наприклад, відеопотік або телеметрія можуть мати вищий пріоритет порівняно зі службовими даними. Це забезпечує прогнозовану якість сервісу навіть у складних умовах.

Оптимізація маршрутів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних MANET-технологій, оскільки дозволяє значно покращити пропускну здатність, зменшити latency та підвищити надійність зв’язку.

2 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ТА МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ

2.1. Алгоритми маршрутизації та побудови маршрутів

2.1.1. Класи алгоритмів маршрутизації

У мобільних самоорганізованих мережах маршрутизація відіграє центральну роль, оскільки структура мережі постійно змінюється, а маршрути повинні динамічно пристосовуватися до втрати вузлів, зміни їх положення та стану радіоканалу. Існує три основні класи маршрутизуючих алгоритмів: реактивні, проактивні та гібридні. Кожен із них реалізує власний підхід до управління маршрутами та має переваги й недоліки залежно від характеристик мережі.

Реактивні (on-demand) алгоритми — наприклад, AODV або DSR — шукають маршрут лише тоді, коли вузол має дані для передавання. Вони надсилають широкомовні запити маршруту, на які потенційні проміжні вузли відповідають інформацією про можливий шлях до цільового вузла. Перевага таких алгоритмів полягає в мінімальному споживанні службового трафіку тоді, коли мережа перебуває у стані спокою. Проте недоліком є збільшення затримки при пошуку маршруту та потенційна перевантаженість каналу у моменти, коли кілька вузлів одночасно виконують ініціалізацію маршруту.

Проактивні (table-driven) алгоритми — такі як OLSR або DSDV — постійно підтримують актуальність таблиць маршрутів. Вузли періодично надсилають службові оновлення, що дозволяє миттєво визначати маршрут для передавання даних. Основною перевагою проактивного підходу є низька затримка при передачі та стабільність маршрутизації у мережах із низькою мобільністю. Однак постійна генерація службових пакетів створює додаткове навантаження, особливо в мережах із великою кількістю вузлів або при швидких змінах топології.

Гібридні алгоритми поєднують сильні сторони двох попередніх підходів. Типові представники — ZRP, HWMP. У таких алгоритмах мережа розподіляється

на локальні зони: для сусідніх вузлів використовується проактивна маршрутизація, що забезпечує швидкий доступ до локальних маршрутів; для віддалених — реактивна механіка, що дозволяє зменшити обсяг службового трафіку. Гібридні алгоритми добре збалансовані, проте вимагають складнішого налаштування параметрів та ретельного вибору розміру зон.

2.1.2. Оцінка ефективності алгоритмів маршрутизації

Оцінювання алгоритмів маршрутизації здійснюється за допомогою низки метрик, які дозволяють визначити їх придатність до роботи в умовах мобільності, змін радіоканалу та обмежених ресурсів вузлів. Основними серед таких показників є латентність, пропускна здатність (throughput) та обсяг службового трафіку (overhead).

Метрики ефективності:

- Латентність (delay) характеризує час, необхідний для доставлення пакету від передавача до одержувача. На цей параметр впливають час пошуку маршруту, кількість проміжних вузлів, стабільність каналу та швидкість адаптації маршрутизатора до змін топології.
- Пропускна здатність (throughput) визначає, скільки корисної інформації може пройти через мережу за одиницю часу. Високий throughput важливий для потокових даних, відеозв’язку та телеметрії.
- Overhead відображає кількість службових пакетів, необхідних для підтримання маршрутизації. Чим більший overhead, тим менше залишається ресурсу каналу для корисних даних.

Реактивні алгоритми демонструють високу продуктивність у мережах із невеликою інтенсивністю трафіку та високою мобільністю. Проактивні — у стабільних мережах із великою кількістю взаємодій між вузлами. Гібридні підходи

забезпечують збалансоване рішення, особливо у складних умовах, де важливо одночасно мінімізувати overhead і підтримувати стабільні локальні маршрути.

2.1.3. Алгоритми з адаптацією до мобільності

У мобільних ad hoc мережах важливо не лише підтримувати маршрути, але й адаптувати їх до змін положення вузлів у просторі. Алгоритми, що враховують мобільність, здатні підвищити стабільність мережі та зменшити кількість розривів.

Предиктивні алгоритми аналізують фактори руху: напрямок, швидкість, ймовірність зміни траєкторії. На основі цих параметрів прогнозують, як зміниться відносне розташування вузлів найближчим часом. Наприклад, якщо два вузли рухаються в протилежних напрямках, маршрутизатор може передбачити швидку втрату зв’язку та відразу обрати альтернативний шлях. У таких моделях часто використовуються, кінематичні рівняння руху, фільтри Калмана, алгоритми навчання на основі історичних даних.

Для підвищення стабільності маршрути можуть обиратися за критеріями, що враховують не лише кількість переходів або якість сигналу, але й тривалість передбачуваної доступності каналу. Завдяки цьому маршрутизатор надає перевагу шляхам, які мають більшу ймовірність залишатися стабільними протягом усього періоду передачі.

2.2. Моделі та методи аналітичної оптимізації

2.2.1. Аналітичні моделі радіозв’язку

Аналітичні моделі поширення радіохвиль є основою для оцінювання дальності зв’язку, прогнозування рівня сигналу та визначення порогів надійності у мобільних самоорганізованих мережах. Класичною та найпростішою моделлю є модель вільного простору (Free Space Path Loss), що описує ослаблення сигналу за

умови відсутності перешкод і прямої видимості між вузлами. Вона широко використовується для попередніх розрахунків, проте у реальних мережах застосовується рідко через значну кількість факторів, які радикально змінюють характер поширення хвиль.

Більш реалістичною є лог-нормальна модель затухання (Log-normal Shadowing), яка враховує ефект великомасштабного затінення та флуктуацій сигналу. Вона дозволяє прогнозувати рівень сигналу в умовах, де є нерівномірний розподіл перешкод — наприклад, у лісовій або змішаній місцевості. Однак ця модель потребує емпіричного визначення параметрів для кожного конкретного середовища, що обмежує її універсальність, але робить надзвичайно корисною для точкового прогнозування.

Однією з найважливіших і найпоширеніших у практиці є модель Окумури–Хата та її модифікації (COST-231), які дозволяють оцінювати затухання в міських, приміських і сільських умовах. Вони враховують висоту передавальної та приймальної антен, частоту сигналу, тип забудови та відстань між вузлами. Їхня ключова перевага полягає в тому, що моделі добре узгоджуються з виміряними даними та забезпечують достатньо високу точність для використання в інженерних розрахунках без необхідності складних симуляцій.

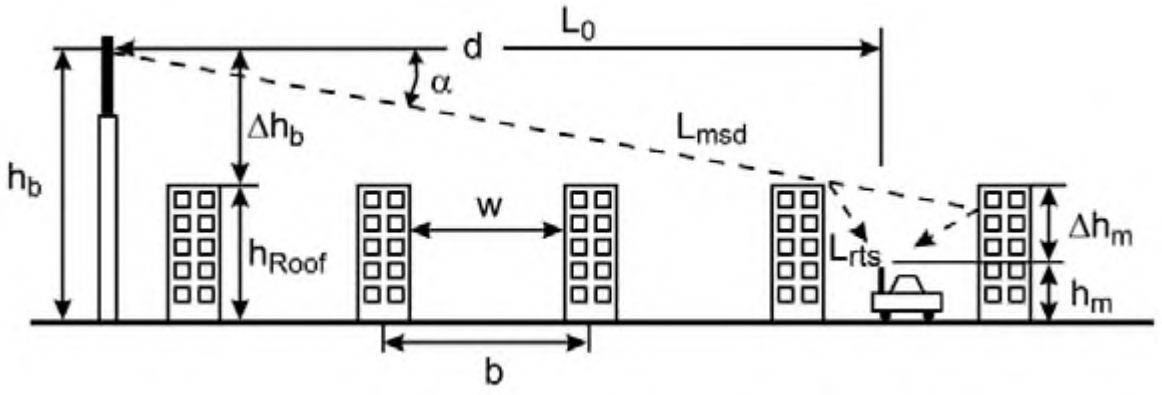


Рис. 2.1 Модель Окумури–Хата

Середовище поширення сигналу має істотний вплив на точність прогнозування. У міських районах переважають багатопроменевість, відбиття та інтерференція, що ускладнює отримання стабільного каналу. У лісових умовах

значну роль відіграє поглинання та розсіювання енергії рослинністю, а у промислових зонах поширення залежить від металевих конструкцій, великої кількості відбиттів і завад від працюючого обладнання. Тому при побудові моделей для мобільних мереж важливо враховувати не лише номінальні значення параметрів, а й їх варіабельність у часі та просторі.

Аналітичні моделі використовуються як основа для оптимізації маршрутів, оцінки пропускної здатності, вибору радіочастоти та прогнозування зон покриття. Вони дозволяють створювати адаптивні алгоритми, що враховують умови середовища та забезпечують більш стабільний і надійний зв’язок.

2.2.2. Методи оптимізації мережевої структури

Оптимізація структури мережі є необхідною умовою для її ефективної роботи, особливо в умовах великої мобільності або високої густоти вузлів. Одним із ключових підходів є оптимізація на основі топологічних критеріїв. Йдеться про пошук такої конфігурації маршрутів, яка мінімізує кількість переходів між вузлами, уникає перевантаження окремих ділянок і забезпечує надійність при появі або зникненні вузлів. У цьому контексті топологія може коригуватися адаптивно — шляхом зміни ролі вузлів, їх кластеризації чи обмеження потужності передавання, що впливає на формування сусідніх зв’язків.

Ще одним аспектом є вибір радіочастотного плану, що відіграє вирішальну роль у зменшенні завад між сусідніми вузлами. Збільшення частотного рознесення між каналами або використання динамічного вибору частоти дозволяє знизити рівень інтерференції, що особливо важливо у щільних мережах або при наявності великої кількості одночасних передавачів. Частотне планування також може враховувати особливості середовища, де поширення хвиль на різних частотах відбувається по-різному.

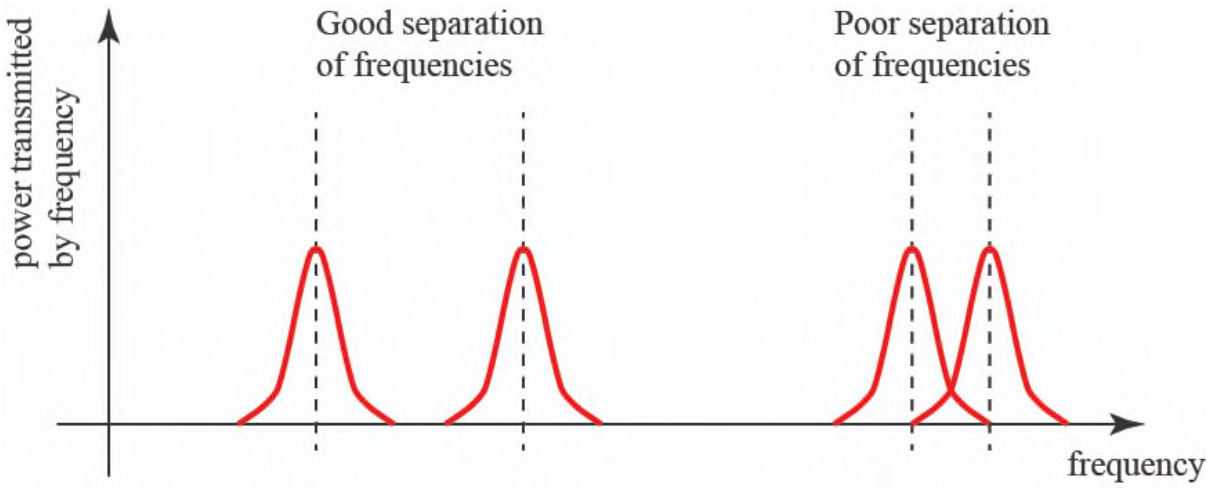


Рис 2.2 Приклад рознесення частоти

Мінімізація завад між сусідніми вузлами є критичним чинником, який безпосередньо впливає на пропускну здатність і стабільність зв'язку. Завади можуть виникати через одночасну передачу, надмірну потужність або невдалий вибір каналу. У практиці для їх зменшення застосовуються адаптивні алгоритми керування потужністю, методи перерозподілу частот, корекція топології шляхом зміни радіусу дії вузлів та виділення пріоритетів для критичного трафіку. Такі методи дозволяють формувати більш збалансовану структуру мережі, яка зберігає працездатність навіть в умовах високої інтенсивності трафіку або динамічних змін топології.

2.2.3. Алгоритмічна оптимізація параметрів вузлів

Алгоритмічна оптимізація параметрів вузлів спрямована на підвищення ефективності роботи мережі через динамічну адаптацію ключових радіотехнічних і мережевих параметрів. Одним із найважливіших методів є адаптивний розподіл потужності. Він передбачає зміну рівня передавальної потужності залежно від якості каналу, відстані до сусідніх вузлів і рівня шуму. Такий підхід дозволяє не лише економити енергію, а й зменшувати інтерференцію, що покращує загальну якість мережі.

Іншим напрямом є динамічний вибір ширини каналу. У широкосмугових системах ширина каналу суттєво впливає на пропускну здатність і стійкість до завад. Збільшення ширини дозволяє передавати більший обсяг даних, проте робить систему чутливішою до шуму та потребує ширшого спектра. Динамічне регулювання ширини каналу дозволяє адаптуватися до умов середовища, балансуючи між швидкістю та надійністю.

Вибір оптимальної модуляції також є ключовим інструментом оптимізації. Схеми з високою спектральною ефективністю, такі як QAM, забезпечують високу швидкість передачі, але потребують високого SNR. У складних радіоумовах більш доцільно використовувати простіші модуляції, такі як BPSK або QPSK, які забезпечують нижчу швидкість, але високу завадостійкість. Алгоритми адаптивної модуляції дозволяють автоматично вибирати найкращий варіант залежно від рівня SINR, тим самим підтримуючи стабільність і продуктивність зв’язку.

Сукупність цих методів — керування потужністю, зміна ширини каналу та адаптивна модуляція — формує основу для інтелектуального налаштування мережі. Вони дозволяють системі реагувати на динамічні зміни середовища, підтримувати оптимальні режими роботи та зменшувати кількість розривів і повторних передавань.

2.3. Мурашині алгоритми в оптимізації маршрутів

2.3.1. Принцип роботи ACO

Мурашині алгоритми (Ant Colony Optimization, ACO) є прикладом біоінспірованих методів оптимізації, які наслідують поведінку колоній мурах у пошуку найкоротшого шляху до джерела їжі. У природному середовищі мурахи не мають карт, глобальної інформації або централізованого контролю, але здатні ефективно знаходити оптимальні маршрути завдяки взаємодії через феромонні сліди. Один із ключових спостережень полягає в тому, що мураха, повертаючись

до гнізда, залишає хімічний слід: чим більше мурах пройшло тим шляхом, тим сильніше феромонне підсилення. Це створює колективний механізм підкріплення маршруту — короткі або ефективні траєкторії накопичують більше феромону, тоді як довгі або ненадійні — поступово «вимирають».

У контексті маршрутизації в мережах ідея феромонів перетворюється на математичну модель оцінювання якості маршруту. Кожен можливий перехід між вузлами має власний феромонний рівень, який відображає придатність цього ребра для передавання трафіку. Якщо маршрут виявляється коротким, стабільним або швидким, алгоритм підсилює його значенням феромону, збільшуючи ймовірність того, що цей шлях буде використаний і надалі. У разі, коли маршрут стає нестабільним або перевантаженим, рівень феромону зменшується, і вузли природно переорієнтовуються на альтернативні шляхи.

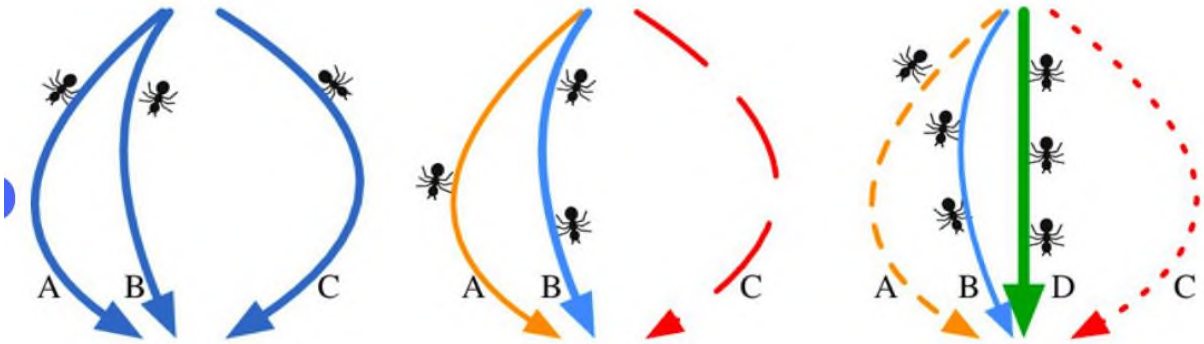


Рис. 2.3 ant colony optimization

Завдяки такій природній колективній поведінці ACO демонструє здатність адаптуватися до умов, що змінюються, та знаходити оптимальні маршрути без централізованого контролера. Ця властивість робить ACO особливо актуальним для мобільних мереж, де маршрути повинні формуватися на основі локальних рішень та оновлюватися в реальному часі.

2.3.2. Адаптація ACO до мобільних мереж

Для застосування мурашиного алгоритму в MANET мережах необхідно враховувати високу динамічність топології та непередбачуваність радіоканалу. На

відміну від стаціонарних мереж, де маршрут може залишатися актуальним протягом тривалого часу, у мобільних системах зникнення або переміщення вузлів призводить до частих змін у структурі графа зв’язків. Тому стандартний механізм накопичення феромонів потребує адаптивного вдосконалення.

Одним із ключових елементів адаптації є динамічне оновлення феромонів. У мобільних мережах феромон не може зберігатися довго, оскільки маршрути мають властивість швидко старіти. Зазвичай застосовуються моделі прискореного випаровування, коли значення феромонів на кожному ребрі систематично зменшуються зі швидкістю, що залежить від темпу змін топології. Це дозволяє алгоритму швидко відмовлятися від застарілих або розірваних маршрутів та переходити до пошуку нових.

У таких системах для підсилення маршруту враховуються не лише довжина або кількість переходів, а й характеристики каналу: рівень сигналу, ймовірність розриву, стабільність RSSI або SINR. Наприклад, якщо певна ділянка зв’язку часто розривається, алгоритм поступово зменшує її феромонний рівень, навіть якщо шлях коротший. Це робить ACO природно стійким до нестабільної топології.

Перевагою підходу є те, що мурашині алгоритми здатні ефективно працювати в умовах, коли класичні протоколи маршрутизації втрачають актуальність через великий службовий трафік або низьку швидкість адаптації. ACO не потребує глобальних оновлень маршрутних таблиць і не створює надмірних broadcast-повідомлень, оскільки рішення формується на рівні локальної взаємодії між вузлами. Завдяки цьому алгоритм залишається продуктивним навіть тоді, коли інші протоколи перевантажують канал.

2.3.3. Порівняння ACO з класичними алгоритмами

Мурашині алгоритми часто демонструють кращу ефективність у динамічних сценаріях порівняно з класичними маршрутними протоколами, такими як DSR, AODV або OLSR. У реактивних протоколах (AODV, DSR) важливою проблемою залишається затримка, пов’язана з пошуком маршруту. Якщо топологія змінюється

швидко, вузол часто змушений повторно ініціювати пошук, що збільшує латентність та службовий трафік. ACO, навпаки, підтримує кілька можливих маршрутів і може обирати оптимальний без повної реконструкції таблиць.

Проактивні протоколи (OLSR) забезпечують миттєве передавання завдяки постійному оновленню маршрутних таблиць, але створюють значний overhead. У мобільних умовах, де топологія змінюється швидко, їхня ефективність падає через потребу у частих оновленнях. Мурашині алгоритми уникають цієї проблеми, оскільки підтримують маршрути за допомогою локальних механізмів і не потребують синхронізації всієї мережі.

До переваг ACO у мобільних мережах належать:

- здатність працювати з неповною інформацією про мережу;
- природне балансування навантаження між кількома маршрутами;
- легка інтеграція метрик якості радіо у модель феромонів;
- більш висока стійкість у сценаріях з частими розривами зв’язку;
- адаптивність до різних типів руху та умов радіо.

Разом із тим ACO має свої недоліки. Алгоритм потребує точного налаштування параметрів випаровування та підсилення феромонів, що може бути складним у гетерогенних мережах. Крім того, у дуже великих мережах кількість «мурашиного» трафіку може зрости, якщо не використовувати обмеження на зони або радіус пошуку. Реалізація ACO інколи є обчислювально складнішою, ніж традиційні протоколи, що може бути критичним для енергообмежених вузлів.

Загалом ACO демонструє значний потенціал як оптимізаційний механізм для побудови маршрутів у сценаріях, де класичні протоколи стикаються з обмеженнями продуктивності. Його гнучкість, здатність до адаптації та природна відповідність децентралізованим умовам роблять ACO перспективним напрямом для сучасних мобільних мереж.

2.4. Оцінювання якості прийнятого сигналу

2.4.1. Метрики якості радіо

У мобільних радіомережах якість прийнятого сигналу є ключовим фактором для побудови стабільних маршрутів та забезпечення надійного обміну даними. Оскільки MANET-системи функціонують у змінних середовищах, показники якості сигналу повинні не лише фіксувати поточний стан, а й давати можливість прогнозування поведінки каналу. Найпоширенішими метриками є RSSI, RSRP, SNR та SINR — кожна з них відображає окрему фізичну характеристику каналу та має свої переваги і обмеження.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) є одним із базових параметрів, який характеризує загальний рівень енергії сигналу, що надходить на приймач. Його перевагою є простота вимірювання й універсальність: RSSI доступний майже у кожному радіомодулі. Недоліком є те, що він не відокремлює корисний сигнал від шуму або інтерференції, тому його точність у складних умовах може бути низькою. У мобільних сценаріях RSSI часто демонструє великі флуктуації — на це впливають багатопроменевість, рух перешкод або зміна орієнтації антен.

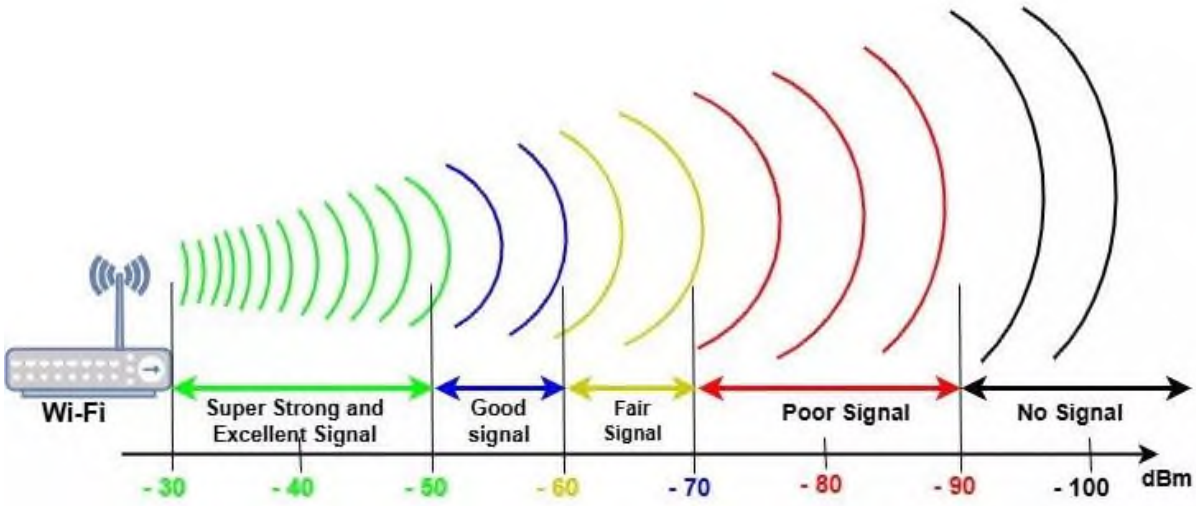


Рис. 2.4 Received Signal Strength Indicator

RSRP (Reference Signal Received Power), який широко використовується в LTE/5G-системах, дозволяє точніше оцінювати рівень корисного сигналу, оскільки вимірює потужність лише опорних сигналів. У MANET-платформах, що базуються на SDR або модемах із сучасними протоколами фізичного рівня, RSRP може бути більш точним індикатором реальної придатності лінії, хоча його доступність залежить від конкретного обладнання.

Більш інформативними метриками є SNR і SINR. SNR (Signal-to-Noise Ratio) відображає співвідношення корисного сигналу до шуму. Високе значення SNR свідчить про стабільність каналу та дозволяє використовувати складніші модулі модуляції. У мобільних умовах SNR змінюється через рух, погіршення видимості або раптову появу перешкод. Проте SNR не враховує інтерференції — це критично в густих мережах.

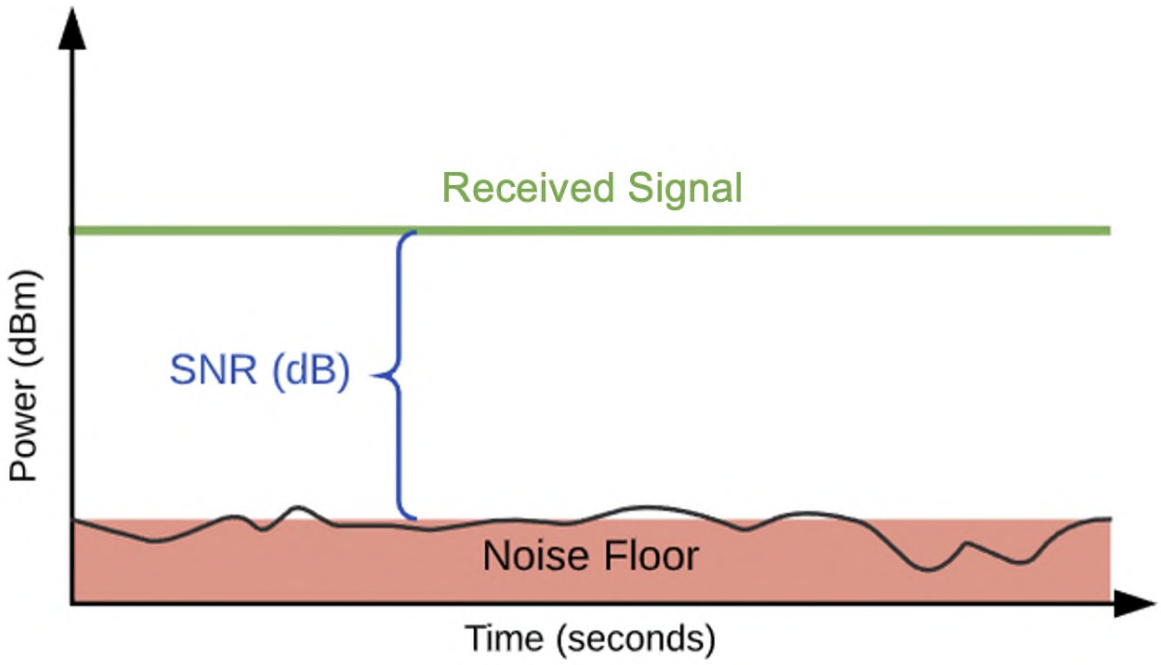


Рис. 2.5 Signal-to-Noise Ratio

SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) є найбільш точним параметром для реальних MANET-систем. Він відображає співвідношення корисного сигналу до шуму та завад від інших передавачів. У мережах, де одночасно працюють десятки й сотні вузлів, саме SINR визначає стабільність каналу та придатність

маршруту. Низький SINR може призвести до значного падіння пропускної здатності, зростання затримок і частих повторних передач.

Оцінюючи практичну точність цих метрик, можна відзначити, що RSSI є корисним для грубої оцінки відстані та наявності зв’язку, SNR — для загальної якості каналу, а SINR — для прийняття коректних рішень у реальному трафіку. RSRP є точнішим, але залежить від технологічної бази конкретної платформи.

У мобільних мережах оптимальним є комбіноване використання кількох метрик.

2.4.2. Методи прогнозування зони покриття

Прогнозування зони покриття є важливою складовою побудови стійких маршрутів. Оскільки мобільні вузли рухаються у просторі, а радіоканал зазнає випадкових флуктуацій, лише оцінки поточного рівня сигналу недостатньо. Для прогнозування використовують методи оцінювання fade margin, моделі поширення та карти рельєфу.

Fade margin — це запас потужності, що дозволяє компенсувати тимчасові зниження рівня сигналу через затінення, багатопроменевість або зміну орієнтації платформи. У MANET fade margin часто розглядається як функція мобільності: для вузлів із високою швидкістю руху (наземні роботи, автомобілі, БПЛА) рекомендується враховувати збільшений запас, оскільки швидкі зміни положення суттєво впливають на рівень сигналу. Використання fade margin дозволяє прогнозувати, коли канал стане непридатним, ще до фактичного розриву.

Для більш точних прогнозів використовуються карти для радіопланування. Вони враховують тип місцевості, рельєф, наявність будівель, рослинності та інших об’єктів. У міських умовах важливо враховувати висоту забудови й щільність розташування будівель — вони визначають рівень затінення та багатопроменевість. У лісових умовах значний вплив мають товщина листяного покриву та вологість, а в промислових районах — металеві конструкції та електромагнітні завади.

У MANET-протоколах прогнозування зони покриття може поєднувати локальні вимірювання з аналітичними моделями: наприклад, RSSI використовується для визначення тенденції зміни сигналу, SINR — для оцінки завадової ситуації, а модель затухання — для прогнозу майбутньої доступності каналу. Така комбінована оцінка дозволяє оптимізувати маршрути ще до того, як виникнуть проблеми зі зв’язком.

2.4.3. Інтеграція сигнал-моніторингу з маршрутизацією

Інтеграція оцінки сигналу з процесом маршрутизації є одним із ключових механізмів підвищення надійності MANET-мереж. У традиційних протоколах рішення про вибір маршруту базується на кількості стрибків або наявності прямого шляху. Однак у мобільних умовах топологія може змінюватися настільки швидко, що маршрути, оптимальні за топологічними критеріями, виявляються нестабільними за якістю радіоканалу.

Для усунення цієї проблеми сучасні підходи включають пріоритезацію маршрутів за якістю лінії. Це означає, що маршрути оцінюються не лише за кількістю переходів, а й за величинами SINR, SNR або комбінованим показником якості. Наприклад, маршрут із більшим числом стрибків може бути кращим, якщо він проходить через вузли з високою якістю каналу.

Не менш важливим є адаптивний вибір наступного вузла, коли рішення про подальший “хоп” приймається з урахуванням поточного стану каналу. Якщо RSSI або SINR починають погіршуватися, вузол може заздалегідь переключитися на інший сусідній вузол із кращими характеристиками каналу. Такий підхід дозволяє зменшити кількість розірваних з’єднань і повторних передач.

Деякі системи реалізують розширений сигнал-моніторинг, коли вузли обмінюються інформацією про якість каналу зі своїми сусідами. Це дає можливість створити розподілену модель стану мережі та підвищити точність рішень при маршрутизації.

Поєднання моніторингу сигналу та інтелектуальних алгоритмів маршрутизації дає змогу створювати маршрути, більш стійкі до завад, мобільності та змін топології.

2.5. Алгоритми керування діаграмою спрямованості антен

2.5.1. Методи оцінки напрямку на джерело сигналу

У мобільних радіомережах визначення напрямку на джерело сигналу є важливим етапом для оптимізації зв’язку, підвищення дальності та покращення завадостійкості. Одним із базових підходів до такої оцінки є аналіз вектора приходу сигналу (Angle of Arrival, AoA). Цей метод дозволяє визначити напрямок на передавач на основі різниці фаз, амплітуд або часу прибуття сигналу на різні антени або елементи антенної системи. У простих випадках, коли використовується пара антен, напрямок визначають за різницею фаз — що більша різниця, то більший кут приходу. У більш складних системах, таких як антенно-решіткові конструкції, AoA обчислюється за допомогою кореляційних методів, які дозволяють одночасно оцінювати кілька напрямків.

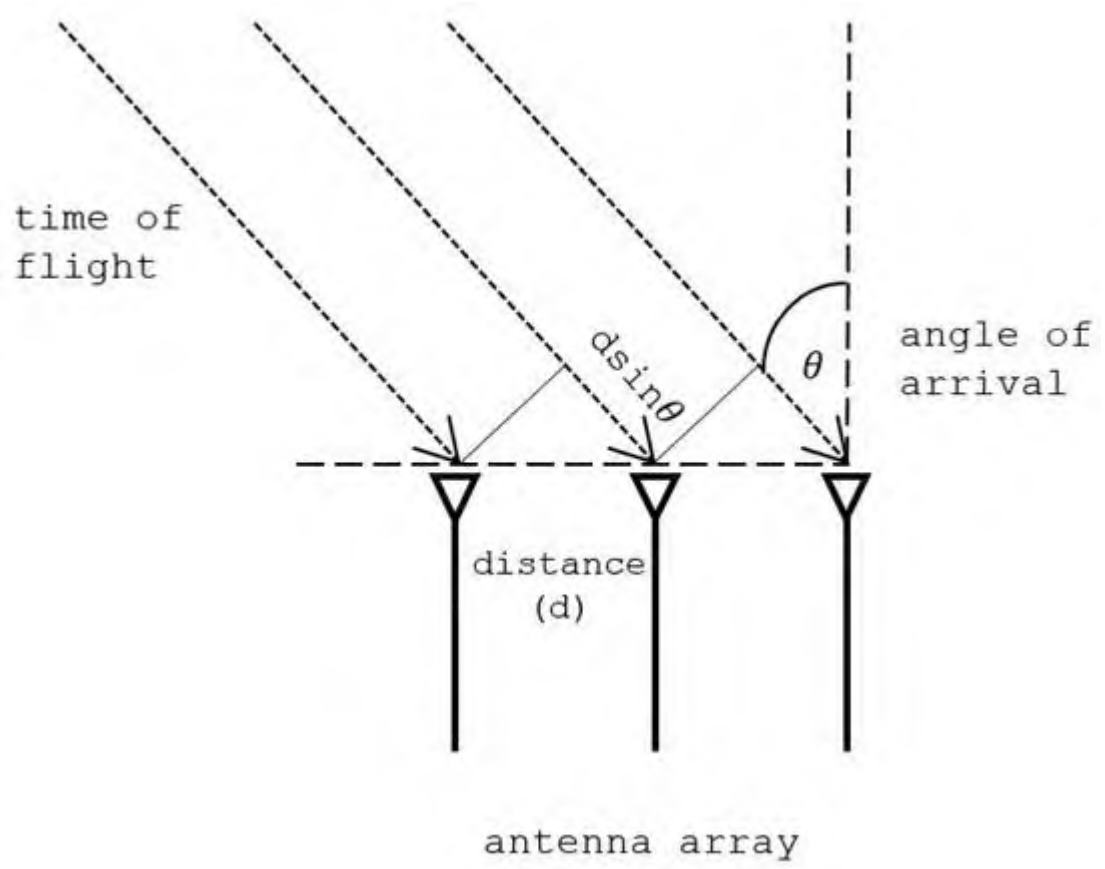


Рис. 2.6 Angle of Arrival

У практичних умовах методи AoA часто поєднуються з відокремленням завадових або паразитних сигналів. Оскільки мобільне середовище містить велику кількість відбиттів, визначення оптимального напрямку є нетривіальним завданням. Для компенсації таких факторів застосовують алгоритми просторової фільтрації, які аналізують енергію сигналу у різних просторових напрямках і визначають напрямок, що забезпечує найвищу стабільність та рівень SINR.

Визначення оптимального напрямку є ключовим для стабільної роботи вузлів із вузькоспрямованими антенами. Якщо антену зорієнтовано правильно, система отримує максимальний рівень сигналу, зменшує завади від сторонніх джерел і забезпечує вищу пропускну здатність. Для мобільних платформ — таких як БПЛА — це має особливе значення, оскільки навіть невелике відхилення антени може призвести до суттєвого погіршення зв’язку або повного розриву каналу.

2.5.2. Алгоритми механічного та електронного повороту антен

Керування напрямком антени може здійснюватися двома основними способами: механічним поворотом та електронним формуванням діаграми спрямованості. Механічні поворотні платформи використовуються в системах, де потрібно фізично змінювати положення антени. Вони забезпечують високу точність наведення та великий діапазон регулювання, що робить їх ефективними для стаціонарних постів, базових станцій або наземних транспортних платформ. Недоліком є обмежена швидкість реакції та чутливість до механічних навантажень, що може бути критичним у динамічних умовах.

Електронне керування діаграмою спрямованості реалізується за допомогою фазованих антенних решіток. Кожен елемент решітки випромінює сигнал із певною фазою, і шляхом зміни фазових зсувів формується промінь у потрібному напрямку. Така технологія дозволяє здійснювати надзвичайно швидке перенаправлення сигналу, що важливо для мобільних вузлів, які постійно змінюють своє положення. Крім того, фазовані решітки дозволяють створювати декілька незалежних променів одночасно, що збільшує пропускну здатність і покращує стійкість до завад.

У мобільних мережах фазовані решітки мають значну перевагу через відсутність рухомих частин, високу надійність і можливість швидкого сканування простору. Проте їх недоліками є висока вартість, складність реалізації та значне енергоспоживання. У системах, де бюджет потужності обмежений — наприклад, на дронах або автономних роботах — застосування фазованих решіток потребує продуманої енергетичної оптимізації.

Механічні платформи, у свою чергу, часто використовуються у гібридних системах — коли основне наведення здійснюється механічно, а дрібні корекції напрямку виконуються електронно. Такий підхід дозволяє компенсувати нестабільність руху та досягти високої точності наведення навіть у складному середовищі.

2.5.3. Критерії вибору оптимального кута наведення

Вибір оптимального кута наведення антени є критичним для забезпечення максимальної якості зв’язку. Основним критерієм є максимізація SNR або SINR, оскільки підвищення рівня корисного сигналу та зменшення впливу шуму й завад безпосередньо покращують пропускну здатність і стійкість каналу. У вузькосмугових системах оптимальний напрямок визначається як напрямок, у якому сигнал має найбільшу амплітуду; у широкосмугових — як напрямок із найкращим значенням SINR.

Водночас у реальних умовах вибір напряму ускладнюється наявністю багатопроменевості. Відбиті компоненти сигналу можуть створювати хибні піки інтенсивності, що призводить до помилкових рішень. Для компенсації цього ефекту використовуються алгоритми згладжування або фільтрації за кутовими характеристиками, які дозволяють відокремити стабільну компоненту сигналу від швидкоплинних відбиттів. Деякі системи застосовують алгоритми аналізу часової різниці приходу сигналів, що дозволяє визначати сигнал прямої видимості (LOS) серед множини відбитих траєкторій.

У мобільних умовах важливо враховувати також динамічні зміни — оптимальний напрямок може змінюватися навіть у межах кількох секунд. Тому алгоритми наведення повинні реагувати не тільки на абсолютні значення метрик, а й на їх тенденцію: якщо сигнал у певному напрямку починає погіршуватися, система повинна швидко переорієнтовуватися до нового максимуму. Це дозволяє підтримувати стабільність зв’язку та уникати швидких розривів, характерних для високошвидкісних платформ.

Загалом оптимальний кут наведення залежить від типу антени, швидкості руху, характеристик середовища, а також метрик якості каналу. Комбіновані алгоритми, що враховують SNR, SINR і динаміку зміни сигналу, забезпечують найбільш стабільну роботу в умовах мобільності та багатопроменевості.

2.6. Алгоритми оцінки маршруту з урахуванням параметрів радіо

2.6.1. Комбіновані моделі прийняття рішень

У мобільних мережах, де топологія змінюється динамічно, а якість радіоканалу залежить від середовища, мобільності та завадової обстановки, вибір маршруту на основі одного критерію є недостатнім. Класичні моделі маршрутизації, що враховують лише кількість стрибків (hop count), не здатні забезпечити стабільний зв'язок у складних умовах, оскільки не відображають реальної якості каналів. Тому у сучасних алгоритмах використовуються комбіновані підходи, що поєднують кілька параметрів: RSSI, SINR, hop count, затримку, рівень перевантаження та стабільність лінії.

RSSI дозволяє швидко оцінити інтенсивність сигналу між двома вузлами, але не враховує рівень шуму та інтерференції. Тому при виборі маршруту значно важливішим показником є SINR, який відображає реальну придатність лінії для передачі даних у присутності завад. У густих або перевантажених мережах саме SINR стає ключовим параметром при визначенні, який маршрут буде більш стабільним.

Разом із тим кількість стрибків залишається важливим фактором. Великі маршрути збільшують затримку, створюють додатковий службовий трафік та підвищують ризик розриву каналу при мобільності вузлів. Тому комбіновані моделі намагаються знайти баланс між мінімальною кількістю стрибків і максимальною якістю окремих каналів.

Мультифакторна оптимізація дає змогу створювати більш стійкі маршрути, які враховують не лише локальні, а й глобальні властивості мережі. Наприклад, якщо два маршрути мають однакову кількість стрибків, але один із них проходить через вузли зі стабільним SINR, алгоритм надасть йому пріоритет. У результаті мережа працює ефективніше, зменшується кількість повторних передач, а затримки стають більш передбачуваними.

2.6.2. Методи зважування параметрів

Щоб комбінувати кілька показників якості маршруту в одному критерію, використовуються методи зважування. Найпростішим є лінійне нормування, коли кожному параметру призначається ваговий коефіцієнт, після чого формується узагальнений індекс якості. Такий підхід дозволяє явно визначати пріоритети: наприклад, у мережах з інтенсивним трафіком вагу SINR можна збільшити, а вагу hop count — зменшити.

У статичних або повільних мобільних сценаріях ключовим може стати коефіцієнт стабільності каналів, тоді як у динамічних мобільних — швидкість зміни показників.

У складніших системах використовуються нелінійні моделі нормування. Це може бути квадратичне або експоненційне підсилення параметрів, коли слабкі канали отримують значно нижчу оцінку, ніж сильні. Такий підхід дозволяє алгоритму різко «відкидати» маршрути з поганими характеристиками, навіть якщо вони виглядають оптимальними за кількістю стрибків.

Важливою особливістю мобільних мереж є необхідність адаптивних коефіцієнтів зважування, які змінюються залежно від поточних умов. Якщо мережа знаходиться в умовах нестачі пропускної здатності, ваговий коефіцієнт SINR збільшується. Якщо вузли надмірно переміщуються, ваговий коефіцієнт стабільності та fade margin стає ключовим. У практичних реалізаціях алгоритм може динамічно змінювати ваги в залежності від середніх показників мережі: наприклад, при зростанні середнього SINR у мережі алгоритм може зменшити значення цього критерію та збільшити вагу затримки.

Комбіновані моделі зі змінними коефіцієнтами дозволяють маршрутизатору вибирати рішення, максимально адаптовані до реальних умов і сценаріїв використання. Це робить мережу більш стійкою до змін середовища, завад, руху й перевантаження.

2.6.3. Алгоритми уникнення перевантажених вузлів

Однією з ключових проблем у самоорганізованих мережах є виникнення перевантаження — вузлів, через які проходить надмірна кількість трафіку. Це призводить до перевантаження каналу, зростання затримки, падіння пропускної здатності та збільшення ймовірності розриву маршруту. У критичних системах це може стати причиною повної втрати зв’язності між частинами мережі.

Алгоритми уникнення перевантажених вузлів передбачають виявлення таких ділянок і динамічний перерозподіл навантаження. Для цього вузли аналізують кількість переданих пакетів, затримку черги та рівень локальної інтерференції. Якщо певний вузол стає перевантаженим, алгоритм зменшує його феромонний рівень (у мурашиних моделях), або знижує пріоритет при виборі маршруту (у традиційних протоколах).

Розподіл між маршрутами дозволяє зменшити ймовірність того, що одна частина мережі стане перевантаженою. Замість того, щоб використовувати один найкоротший маршрут, алгоритм може обрати кілька альтернатив з різними характеристиками радіо, а трафік між ними буде пере-розподілятися пропорційно їхній доступності. Такий підхід особливо ефективний у багатоканальних мережах, де різні маршрути можуть використовувати різні частоти або різні типи антен.

У динамічних умовах алгоритми уникнення перевантажень працюють у режимі реального часу, аналізуючи зміну навантаження на вузлах та адаптуючи маршрутизацію без централізованого контролера. Це дозволяє забезпечити стабільність роботи мережі навіть при значних змінах топології або появі нових джерел трафіку.

Поєднання цих методів забезпечує підвищену живучість мережі, знижує ризик критичних відмов і підтримує стабільну якість обслуговування навіть у складних сценаріях.

3 ПОБУДОВА УНІВЕРСАЛЬНОЇ МЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ТА ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ

3.1. Концепція створення комплексної тестової мережі

Створення універсальної тактичної мобільної мережі потребує інтеграції різних технологічних підходів, діапазонів частот, типів обладнання та сценаріїв використання. У сучасних умовах мобільні підрозділи, наземні роботизовані системи, безпілотні літальні апарати, стаціонарні пости та командні центри працюють у різнорідних середовищах, але повинні залишатися частиною єдиного комунікаційного простору. Це формує потребу у побудові комплексної тестової мережі, здатної моделювати широкий спектр тактичних ситуацій та забезпечувати взаємодію між гетерогенними вузлами.

Актуальність розробки такої мережі обумовлюється тенденціями розвитку сучасних засобів зв’язку. MANET-технології активно використовуються у військових, рятувальних, охоронних і критичних інфраструктурах, де зв’язок має залишатися функціональним за умов відмов вузлів, зміни топології та обмеженої наявності фіксованої інфраструктури. У типовому оперативному середовищі не існує можливості розгорнути класичні мережеві рішення, тому самоконфігурація, мобільність і багатоканальність стають головними вимогами до систем зв’язку.

Разом з тим на сьогодні відсутня платформа, яка б одночасно підтримувала різні частотні діапазони, різні режими мобільності, різні типи передавання даних та різні радіотехнічні характеристики вузлів. Наприклад, автомобільні та роботизовані платформи використовують L-діапазон для стабільного середньо та дальнього зв’язку; стаціонарні вузли — S- або UHF-діапазони; аеростат потребує каналів великої дальності; БПЛА застосовують 5.8 GHz для відео-передачі. Об'єднання цих компонентів у єдину структуру вимагає побудови універсальної тестової моделі, на основі якої можна досліджувати оптимальні методи маршрутизації, керування потужністю, аналізу покриття та розподілу ресурсів.

Унікальність підходу полягає в тому, що запропонована мережа поєднує у собі декілька тактичних сценаріїв, що зазвичай розглядаються окремо: мобільні групи, висотні ретранслятори, стаціонарні вузли, офісні центри керування, віддалені точки, а також безпілотні апарати з високими вимогами до пропускної здатності. Універсальна мережа дозволяє моделювати повну взаємодію, передавання трафіку між кластерами та поведінку маршрутизаторів у гібридних умовах.

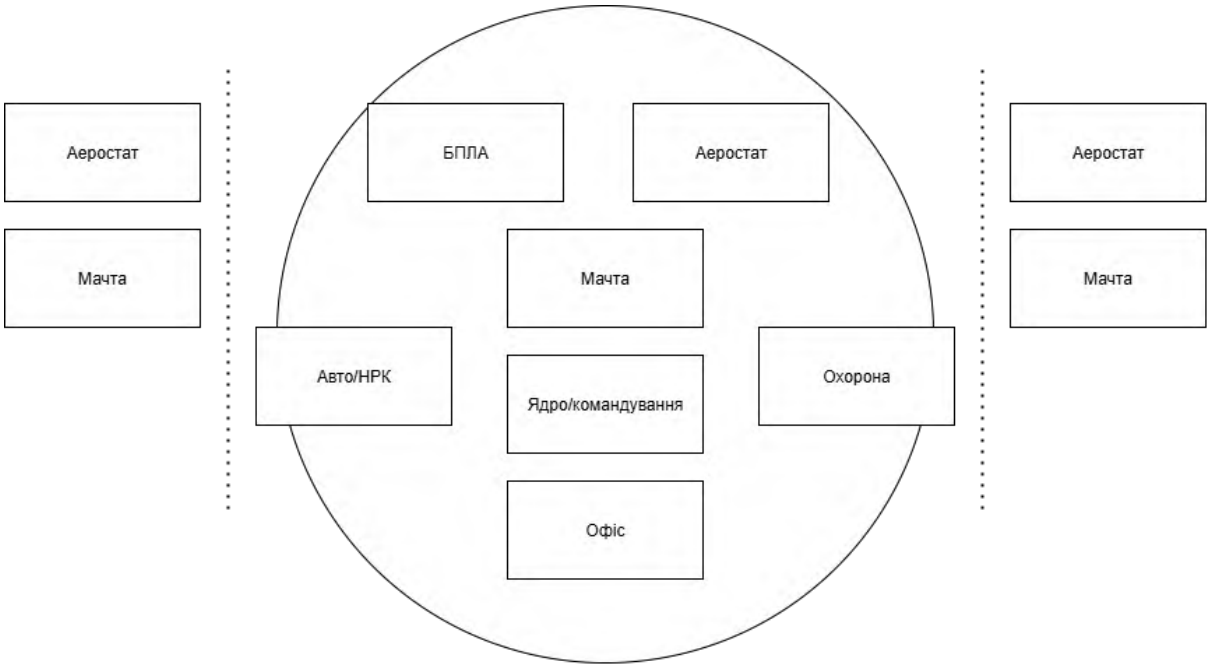


Рис. 3.1 Структура універсальної тестової мережі

Однією з ключових переваг створення такої тестової моделі є можливість перевірки та оптимізації алгоритмів, які в реальних умовах неможливо дослідити ізольовано. Наприклад, поведінка маршрутизаторів у мережі з різними діапазонами залежить від параметрів радіоканалу; алгоритми кластеризації працюють по-різному для мобільних і стаціонарних вузлів; методи оцінки сигналу та керування антеною змінюються залежно від швидкості та типу платформи. Комплексна модель дозволяє виявити ці закономірності та адаптувати алгоритми під реальні задачі.

Для побудови універсальної тестової тактичної мережі визначено перелік вимог, яких повинна дотримуватися система. По-перше, мережа має бути стійкою до втрат окремих вузлів, динамічної зміни топології та радіоперешкод. По-друге, вона повинна мати механізми самовідновлення, що забезпечують автоматичне перевизначення маршрутів і швидку реконфігурацію. По-третє, архітектура повинна мати декілька діапазонів частот, щоб підтримувати різні сценарії та дозволяти розвантаження каналів. По-четверте, важливою вимогою є низька затримка, особливо для відеопотоків і каналів реального часу (БПЛА, автомобілі, ретранслятори).

Таблиця 3.1

Вимоги до універсальної моделі мережі

Назва	Стійкість	Пропускна здатність	Затримка	Потужність
Ядро	Декілька діапазонів	Висока пропускна здатність	Низькі затримка	Висока
Мачти	Декілька діапазонів	Висока пропускна здатність		Висока
БПЛА		Висока пропускна здатність	Низькі затримка	Висока
Авто/НРК				
Охорона				
Офіс				
Аеростат	Декілька діапазонів	Висока пропускна здатність		Висока

З огляду на ці вимоги пропонується будувати модель на основі принципів модульності, гібридності та кластерності.

- Модульність дозволяє включати або виключати окремі типи вузлів залежно від сценарію дослідження.
- Гібридність забезпечує можливість одночасної роботи на різних частотах та підтримку різних протоколів.
- Кластерність дозволяє структурувати мережу за функціональними зонами, зменшити перевантаження та підвищити живучість.

У підсумку запропонована концепція комплексної тестової тактичної мережі створює умови для глибокого дослідження поведінки MANET у реальних умовах, забезпечує гнучкість експериментів та дає можливість на основі практичних спостережень формувати рекомендації щодо оптимальних архітектур зв’язку для різних типів мобільних платформ і сценаріїв

3.2. Основні сценарії застосування

Розробка універсальної тактичної мережі передбачає охоплення різних типів оперативних ситуацій, які в реальності відрізняються за швидкістю руху вузлів, їх щільністю, вимогами до пропускної здатності та стійкості радіоканалу. Для досягнення практичної придатності модель повинна враховувати широкий спектр сценаріїв — від мобільних платформ до стаціонарних пунктів і висотних ретрансляторів. Кожен із цих сценаріїв формує специфічні вимоги до частотного діапазону, радіусів дії, затримок та стабільності зв’язку, що безпосередньо впливає на загальну архітектуру мережі.

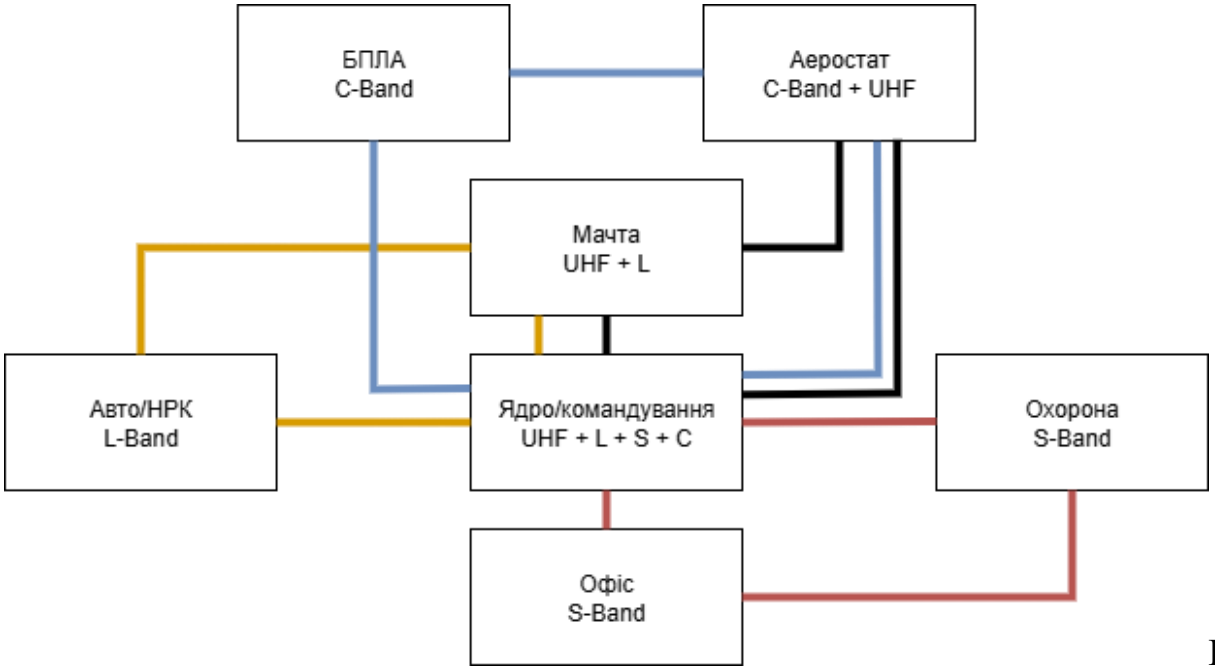


Рис. 3.2 Схема розподілення частот

Автомобілі та наземні роботизовані платформи (1.3 GHz L-band)

Цей сценарій передбачає середньо швидкісну мобільність, змінну топологію та потребу в стабільному радіоканалі на середні дистанції. L-діапазон забезпечує достатню проникність через перешкоди та відносно високу стійкість до федінгу. Автомобільні комплекси часто виступають проміжними вузлами маршрутизації, а наземні роботи — кінцевими вузлами з обмеженим енергоресурсом.

Вимоги:

- стабільність каналу при русі 20–60 км/год;
- помірні вимоги до пропускної здатності (телеметрія + командні пакети);
- радіус дії — кілька сотень метрів – 1.5 км;
- низька чутливість до багатопроменевості порівняно з високими діапазонами.

Офісний центр або командний пункт (2.4 GHz S-band)

Стаціонарні і напівстаціонарні вузли мають меншу мобільність, але значно більші вимоги до пропускної здатності та якості зв’язку. У командному пункті

здійснюється маршрутизація великих потоків даних, інтеграція кількох кластерів та взаємодія з мережевим ядром. 2.4 GHz забезпечує високу пропускну здатність і доступність обладнання, хоча страждає від підвищених рівнів завад.

Вимоги:

- високий SINR;
- підтримка багатоканальних потоків;
- можливість виступати центральним вузлом кластеру;
- стійкість до перевантаження.

Охорона периметру та стаціонарні пости (2.4 GHz)

Цей сценарій включає вузли з фіксованою або низькою мобільністю, які повинні забезпечувати стабільний зв’язок на обмеженій території (периметр бази, промислового об’єкта, складу тощо). Головною характеристикою є сталість топології та можливість створення високонадійної сітки з кількома резервними маршрутами.

Вимоги:

- великий рівень надмірності маршрутів;
- низькі затримки для інфраструктурних сенсорів чи камер;
- мала чутливість до втрати одного вузла;
- можливість встановлення підсилених антен з фіксованим напрямком.

Аеростат як висотний ретранслятор (5.8 GHz + UHF)

Використання аеростата або іншого висотного носія дозволяє сформувати надкластерну структуру, у якій висотний вузол забезпечує великий радіус покриття та виконує функцію магістрального ретранслятора. Завдяки прямій видимості він може підтримувати зв’язок із віддаленими вузлами навіть у складних ландшафтних умовах.

5.8 GHz забезпечує високу пропускну здатність (переважно для відео), тоді як UHF використовується як резервний канал великої дальності.

Вимоги:

- стабільність у багатопроменевому середовищі;
- підтримка декількох незалежних потоків;
- дальність зв’язку десятки кілометрів;
- низькі затримки між кластерами.

Мачта (UHF + L-band)

Такий тип застосування використовується для створення стійких магістральних каналів на середні та великі дистанції, особливо там, де неможливо розгорнути волоконно-оптичні лінії або де потрібне дублювання критичних каналів. UHF має високу проникність і працює на великих дистанціях, тоді як L-band служить як високопродуктивний резерв або канал керування.

Вимоги:

- надійність каналу, мінімальна ймовірність втрати пакета;
- підтримка стабільної швидкості незалежно від погоди;
- низькі вимоги до мобільності, висока залежність від висоти антен.

БПЛА з відео- та телеметричними каналами (5.8 GHz C-band)

БПЛА характеризуються високою швидкістю руху, динамічною зміною висоти та складною траєкторією польоту. Канал зв’язку повинен підтримувати великі швидкості передачі відео, а також телеметрію й команди керування. Діапазон 5.8 GHz забезпечує необхідну пропускну здатність, але є значно чутливішим до перешкод та втрати прямої видимості.

Вимоги:

- низькі затримки (<50–80 ms);
- висока стійкість до федінгу у русі;
- можливість швидкого перемикання між маршрутами;
- прогнозування втрати каналу за RSSI/SINR.

Узагальнення сценаріїв

Всі описані сценарії формують вимоги до побудови універсальної моделі мережі:

- різні частотні діапазони - різні кластери;
- різні швидкості руху - різні алгоритми маршрутизації;
- різні вимоги до пропускної здатності - різні радіотехнічні параметри;
- різні вимоги до дальності - різні типи антен і потужностей.

Таблиця 3.2

Вимоги до тестової топології

Сценарій	Частота, МГц	Потужність, W	Радіус, km	Вимоги
Ядро	310, 1400, 2200, 4900	20	5	Відмовостійкість, всі діапазони, швидкість, доступність.
Мачта	310, 1400	20	10-100	Надійність, стабільність, покриття
Аеростат	310, 4900	20	10-100	Надійність, стабільність, покриття
БПЛА	4900	10	10-100	Дальність, смуга пропускання, затримка
Авто	1400	20	1-10	Мобільність, стійкість каналу
Охорона	2200	4	0.1-5	Підтримка фіксованих сенсорів, відмовостійкість
Офіс	2200	1	0.1-0.5	Мала потужність, мобільність, стійкість до перевантаження

3.3. Обґрунтування вибору частот і типів станцій

Вибір частотного діапазону та типів станцій є одним із ключових етапів побудови універсальної тактичної мережі, оскільки саме спектральні характеристики визначають можливості передавання даних, рівень стійкості зв’язку та придатність мережі до роботи в різнорідних умовах. Запропонована модель охоплює кілька діапазонів, які відрізняються не лише фізичними властивостями, а й функціональним призначенням у структурі майбутньої системи. Такий підхід дає змогу відтворити широкий спектр сценаріїв застосування та забезпечує коректність результатів під час подальшого аналізу поведінки мережі.

Низькочастотний UHF-діапазон (близько 310 МГц) характеризується найбільшою дальністю та здатністю проходити крізь перешкоди, що обумовлює його використання для магістральних каналів між стаціонарними пунктами та висотними ретрансляторами. У цьому діапазоні радіохвилі зазнають найменших втрат на трасі, а вплив рельєфу та забудови є менш критичним, ніж у високочастотних сегментах. Саме тому він забезпечує основу для каналу “мачта – віддалений пункт” і виконує роль резервного тракту для аеростатів або командних центрів. Характеристики цього діапазону дозволяють забезпечувати зв’язок на десятки кілометрів, що є важливим для підтримання стійкості мережі у випадку часткової втрати наземних вузлів.

L-діапазон (приблизно 1.4 ГГц) поєднує в собі кращу пропускну здатність порівняно з UHF та відносно помірну чутливість до перешкод. Завдяки такому балансу він добре підходить для автомобільних систем і наземних роботизованих платформ, які працюють у середовищі з динамічною зміною топології. У цьому діапазоні забезпечується достатня дальність дії для комунікації між мобільними вузлами, а також зберігається стійкість до багатопроменевого поширення, характерного для міської забудови.

Діапазон 2.2–2.4 ГГц (S-band) є оптимальним для зон з високою щільністю трафіку та вимогами до значної пропускної здатності. Його доцільно використовувати у стаціонарних сегментах мережі, наприклад у командному пункті або системах охорони. Тут частота забезпечує достатню швидкість передавання даних для обслуговування відеокамер, інфраструктурних сенсорів та внутрішньої мережевої взаємодії. Хоча цей діапазон є більш чутливим до завад та має меншу дальність, його переваги полягають у підтримці сучасних протоколів та можливості обслуговування великої кількості клієнтів у межах одного кластеру.

Використання діапазону 4.9 ГГц та 5.8 ГГц зумовлене потребою у високій пропускній здатності при мінімальних затримках, зокрема для каналів БПЛА. На цих частотах можливе передання потокового відео у реальному часі, телеметрії та службових даних управління. Хоча хвилі вищих частот значно чутливіші до перешкод, їх робота на великих висотах польоту БПЛА компенсує цей недолік. За умов прямої видимості саме високочастотні діапазони забезпечують найкращу якість сигналу та високу стійкість до навантаження.

Загальне порівняння можливостей використаних діапазонів свідчить про те, що кожний із них виконує у мережі свою функціональну роль. UHF забезпечує основу покриття та магістральний зв’язок, L-band утворює середньодальній мобільний сегмент, S-band відповідає за високу пропускну здатність і взаємодію стаціонарних вузлів, а діапазони 4.9 та 5.8 ГГц обслуговують високошвидкісні та вимогливі до якості канали. Такий розподіл частот дозволяє уникнути конфліктів за спектр, зменшує рівень міжкластерних завад і забезпечує адаптивність маршрутизації у динамічних умовах.

Обрані частоти визначають також типи станцій, які доцільно використовувати у різних сегментах моделі. Мобільні платформи оснащуються радіомодулями середньої потужності з широкою смугою робочих температур та антенами із середньою діаграмою спрямованості. Стаціонарні вузли доцільно будувати на SDR-рішеннях, що дозволяє змінювати робочі частоти та параметри модуляції залежно від умов. Висотні ретранслятори, такі як аеростати, потребують обладнання з низькою масою, широкою смугою пропускання та підвищеною

стабільністю. БПЛА, у свою чергу, оснащуються високочастотними передавачами малої потужності, оптимізованими для роботи з антенами вузької діаграми спрямованості.

Регуляторні вимоги, що стосуються максимальної допустимої потужності передавачів, також впливають на вибір діапазонів. У нижчих діапазонах традиційно дозволяється вища потужність, тоді як високочастотні діапазони мають обмеження, що зумовлено щільністю використання спектра. З урахуванням цих обмежень формуються режими роботи станцій у межах тестової моделі, а також визначаються можливості масштабування та резервування каналів.

Новизна обраного підходу полягає у використанні мультидіапазонної архітектури, яка дозволяє поєднувати кілька різних сценаріїв роботи у рамках однієї мережі. На відміну від класичних MANET-систем, що зазвичай функціонують у вузькому діапазоні частот, ця модель забезпечує комплексну адаптацію маршрутів до радіотехнічних умов і дозволяє розподіляти навантаження між кількома частотними сегментами. Таким чином досягається підвищення відмовостійкості, зменшення рівня завад, підвищення пропускної здатності та забезпечення гнучкого керування ресурсами мережі у складних тактичних умовах.

3.4. Формування параметричної таблиці вузлів

Побудова універсальної тестової мережі потребує формалізації характеристик кожного типу вузлів, що входять до її складу. Для цього необхідно визначити набір параметрів, які дозволяють порівнювати різні елементи мережі між собою, оцінювати їхній вплив на загальну топологію та визначати можливості інтеграції окремих сегментів у єдину структуру. Формування узагальненої параметричної таблиці є важливим етапом, оскільки створені на її основі дані використовуються у подальшому під час кластеризації мережі та оптимізації маршрутів.

Першу групу параметрів становлять радіочастотні характеристики, що визначають фізичну поведінку вузла у конкретному діапазоні. До них належать робоча частота, вихідна потужність передавача, ширина каналу та тип антени. Частота впливає на дальність зв’язку, проникність сигналу крізь перешкоди та рівень міжмодуляційних завад. Потужність визначає здатність вузла підтримувати стабільний канал у складних умовах та компенсувати втрати на трасі. Ширина каналу безпосередньо впливає на пропускну здатність, а тип антени — на діаграму спрямованості, що є критичним фактором для БПЛА, аеростатів та магістральних ліній.

Другий блок параметрів відображає мережеві особливості вузлів. До них відносять пропускну здатність, допустиму кількість переходів (hop-limit) та функціональну роль кожного елемента у мережі. Пропускна здатність визначає, які типи трафіку вузол може обслуговувати без перевантаження. Обмеження за кількістю переходів визначають максимальну глибину маршрутизації, що особливо критично у великих багатокластерних структурах. Роль вузла — стаціонарний вузол, мобільна платформа, висотний ретранслятор або магістральний елемент — впливає на його місце у топології та визначає, чи повинен він брати на себе додаткові функції, наприклад агрегацію трафіку або динамічне перенаправлення маршрутів.

Окрему групу становлять мобільні характеристики, які описують можливості вузлів щодо переміщення у просторі. Для мобільних платформ важливими є швидкість руху, стабільність положення у просторі та тип траєкторії. Автомобільні комплекси, наприклад, потребують стабільності каналу при русі зі швидкістю 20–60 км/год, тоді як БПЛА характеризуються змінною висотою та складними траєкторіями, що впливають на динаміку зміни рівня сигналу. Стаціонарні вузли, навпаки, не мають мобільності, але можуть перемагати іншими параметрами, такими як висока потужність передавача або можливість встановлення великогабаритних антен із вузькою діаграмою спрямованості.

Систематизація цих параметрів дозволяє побудувати узагальнену таблицю вузлів, яка включає автомобільні платформи, БПЛА, стаціонарні пункти,

аеростати, магістральні мачти та офісний сегмент. У таблиці фіксуються всі необхідні характеристики, що визначають поведінку вузла у мережі та його взаємодію з іншими елементами. Таке структурування дає можливість порівнювати різні типи вузлів за однаковими критеріями, виявляти спільні та відмінні риси, а також визначати потенційні “вузькі місця”, які можуть впливати на пропускну здатність або стабільність мережі.

Таблиця 3.3

Параметри вузлів мережі

Частота МГц	Потужність Вт	Антена	Ширина каналу	Пропускна здатність	Мобільність
Ядро					
310	20	всеспрямована	20	50-100	-
1400	20	всеспрямована	20	50-100	-
2200	20	всеспрямована	20	50-100	-
4700	20	всеспрямована	20	50-100	-
Мачта					
310	20	4х направлених	10	1-30	-
1400	20	4х направлених	10	1-40	-
Аеростат					
310	20	всеспрямована	10	1-30	+
4700	20	всеспрямована	10	1-50	+
БПЛА					
4700	10	всеспрямована	5	1-20	+
Авто/НРК					
1400	20	всеспрямована	5	1-15	+

Продовження Таблиця 3.3

Охорона					
2200	4	всеспрямована	2.5	1-5	+
Офіс					
2200	1	всеспрямована	5	1-20	-

У підсумку сформована параметрична інформація створює основу для наступного етапу — кластеризації мережі. Кластеризація потребує чітких вхідних даних, оскільки групування вузлів за частотою, мобільністю або функціональною роллю напряму залежить від тих характеристик, які були визначені у параметричній таблиці. Саме тому коректність і повнота сформованих параметрів визначають якість подальших аналітичних рішень та ефективність роботи мережі у різних сценаріях.

3.5. Кластеризація побудованої моделі

Кластеризація мережі є одним з основних механізмів забезпечення стабільності та керованості у великомасштабних тактичних системах зв’язку. Універсальна тестова мережа, яка поєднує мобільні, висотні та стаціонарні вузли різних типів, потребує структурного поділу для уникнення перевантаження маршрутних протоколів, зменшення сигнального трафіку та підвищення живучості всієї структури. У складних умовах роботи MANET надлишкова маршрутизаційна активність призводить до затримок, втрат пакетів та деградації пропускної здатності. Поділ мережі на логічні та фізичні кластери дозволяє значно зменшити

ці ризики, локалізувавши мережеву взаємодію в межах окремих груп вузлів та обмеживши обсяг трафіку, який повинен циркулювати між ними.

Первинним рівнем кластеризації є поділ за частотними діапазонами. Кожен із використаних діапазонів забезпечує специфічні радіочастотні властивості, що визначають дальність дії, пропускну здатність і рівень чутливості до перешкод. Таким чином формуються окремі частотні кластери: вузли UHF створюють магістральні та резервні канали великої дальності; L-діапазон об’єднує мобільні наземні платформи, що потребують балансу між проникністю та пропускною здатністю; S-діапазон утворює кластер стаціонарних та охоронних вузлів; сегмент 4.9–5.8 ГГц формує групу високошвидкісних каналів для БПЛА. Такий розподіл дозволяє мінімізувати взаємні завади та забезпечує можливість незалежної оптимізації кожного спектрального сектора.

Другим видом кластеризації є топологічна, що враховує не частоту, а фізичні та функціональні властивості вузлів. Мобільні платформи, стаціонарні пункти і висотні ретранслятори утворюють окремі групи, які суттєво відрізняються за поведінкою у мережі. Мобільні вузли, що постійно змінюють положення у просторі, мають обмежений час існування маршрутів та вимагають алгоритмів швидкого перебудування топології. Стаціонарні вузли забезпечують фіксовані точки прив’язки мережі, виступають опорними центрами обміну даними та можуть брати на себе частину маршрутизаційного навантаження. Висотні вузли, такі як аеростати, формують надтопологічний рівень, який забезпечує взаємозв’язок між різними сегментами та виконує функцію широкозонного покриття.

Сценарна кластеризація є третім рівнем структурування. Вона групує вузли відповідно до того, яке завдання вони виконують у реальній операційній ситуації. Так, окремі кластери утворюють вузли охорони, командні пункти, транспортні платформи, БПЛА та магістральні лінії. Кожен сценарій має свої вимоги до затримки, пропускної здатності, стійкості та надійності, тому їх об’єднання у межах одного кластеру дозволяє застосовувати оптимізовані параметри роботи, адаптовані саме до потреб конкретної групи вузлів.

Для забезпечення взаємодії між кластерами необхідно використовувати вузли-шлюзи, які водночас належать до двох сусідніх кластерів або мають можливість працювати у кількох частотних діапазонах. Такі вузли виконують роль проміжних ланок, які передають дані між сегментами та забезпечують узгодженість маршрутів. Їх робота є критично важливою для підтримання агрегованої топології, у якій кожен кластер може функціонувати автономно, але водночас залишатися частиною єдиного мережевого простору. У запропонованій моделі роль міжкластерних вузлів часто відіграють автомобільні комплекси або командний пункт, здатні працювати у кількох діапазонах.

Особливе місце займають високорівневі вузли, такі як аеростат та командний пункт. Аеростат виконує функцію надкластерного ретранслятора, який створює вертикальний канал зв’язку між мобільними, стаціонарними та магістральними сегментами. Командний пункт, у свою чергу, стає основним обчислювальним центром, що концентрує значну частину трафіку та може здійснювати координацію алгоритмів маршрутизації. Його положення в мережі визначає топологічну спрямованість потоків даних, оскільки він часто виступає кінцевою або проміжною ланкою у складних маршрутах.

Загальна структура кластерів демонструє, що побудована мережа має багаторівневу організацію, у якій частотні, топологічні та сценарні класифікації накладаються одна на одну. Це забезпечує гнучкість і стійкість до змін умов, оскільки кожен кластер може функціонувати автономно, але водночас має доступ до інших сегментів через систему вузлів-шлюзів. Така архітектура забезпечує баланс між локальною оптимізацією параметрів та можливістю організації маршрутів на великі відстані.

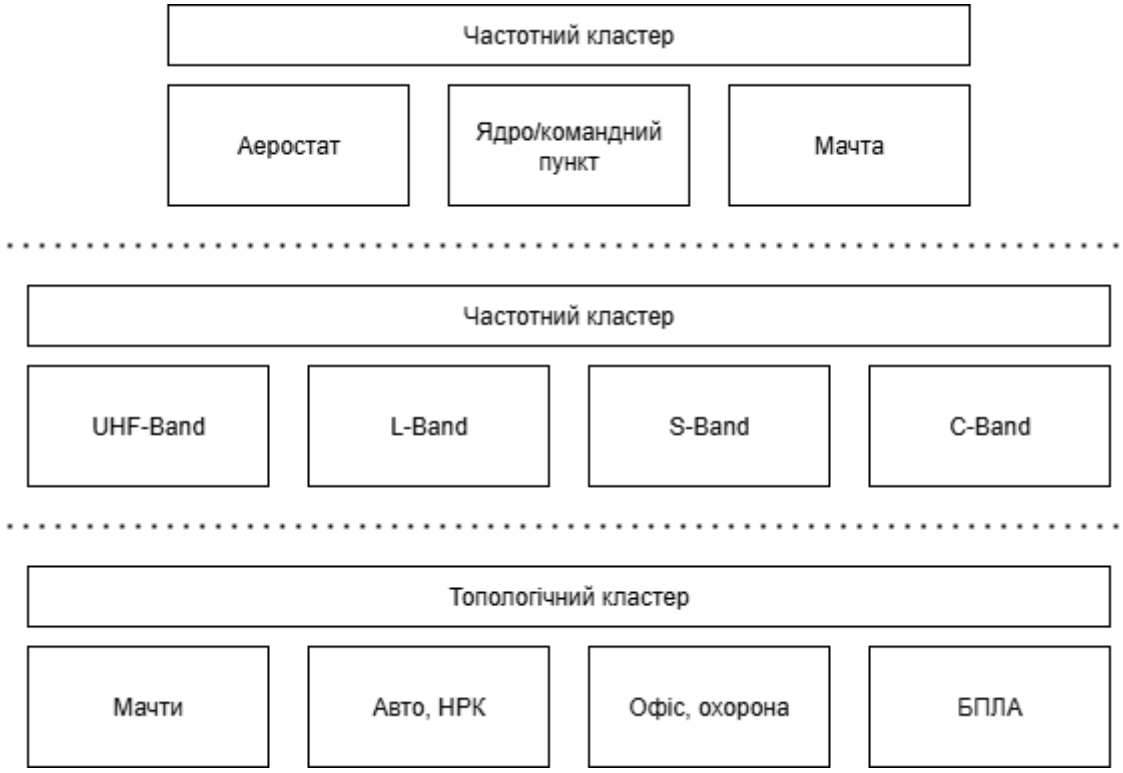


Рис. 3.3 Блокова діаграма кластерів

3.6. Структурна схема мережевої конфігурації

Структурна схема побудованої мережі відображає логічні зв’язки між основними елементами системи та демонструє принципи взаємодії між різними кластерними сегментами. У запропонованій архітектурі мережа складається з трьох узагальнених рівнів: надкластерного, кластерного та прикладного. Така ієрархія дозволяє не лише спростити управління мережею, але й забезпечує її гнучкість, масштабованість та відмовостійкість у реальних тактичних умовах.

У верхній частині структурної схеми розташовані високорівневі вузли, які визначають загальну архітектуру та забезпечують можливість взаємодії між віддаленими сегментами мережі. До цієї групи належать аеростат, командний пункт та магістральні стаціонарні пункти. Аеростат виконує роль висотного ретранслятора, що формує надшироку зону покриття й забезпечує зв’язок між кластерами, які не мають прямої видимості один із одним. Командний пункт працює як центральний вузол логічного управління та канал об’єднання

різнотипних потоків даних, а магістральна лінія забезпечує резервування та розширює зону покриття системи поза межами основного району розгортання. Разом ці вузли створюють надкластерний рівень мережі, який можна розглядати як “скелет” системи, що підтримує її структурну цілісність.

У середній частині схеми розміщені частотні кластери, які відображають поділ мережі за спектральними ознаками. Кластери L-, S-, UHF- та C/5.8-діапазонів функціонують автономно й мають власні внутрішні маршрути, що мінімізують міжкластерний трафік та знижують навантаження на ресурси маршрутизації. У межах кожного кластеру працюють вузли, адаптовані до специфічних частотних характеристик: автомобільні платформи та наземні пристрої — у L-кластері, стаціонарні охоронні системи та офісні вузли — у S-кластері, магістральні лінії — в UHF-кластері, а БПЛА — у високочастотному сегменті. Такий поділ дозволяє враховувати фізичні параметри кожного діапазону та підвищує ефективність мережі в цілому.

Між кластерними сегментами існують спеціальні вузли-шлюзи, які забезпечують обмін даними й синхронізацію між частотами. Ці вузли мають можливість працювати у кількох діапазонах або здійснюють ретрансляцію трафіку між елементами різних кластерів. Їх функціонування критично важливе для підтримання єдності мережі, оскільки саме вони забезпечують маршрути, що дозволяють даним переходити з одного частотного середовища в інше. Взаємодія між кластерами здійснюється через магістральні або висотні канали, що дозволяє уникати перевантаження внутрішніх маршрутів та забезпечує високу стійкість при відмовах окремих вузлів.

У нижній частині структурної схеми розташовані прикладні вузли, які безпосередньо виконують функції, пов’язані з тактичними завданнями. До них належать автомобільні комплекси, мобільні роботи, стаціонарні пости охорони, сенсорні станції та БПЛА. Вони формують локальні зони зв’язку та передають трафік вищим рівням мережі через відповідні вузли-шлюзи або безпосередньо взаємодіють з надкластерними елементами. Логіка побудови таких маршрутів відповідає моделі “ядро — крайні вузли — ретранслятор”, де крайні елементи

здійснюють локальний збір даних, а ретранслятори та центральні вузли забезпечують їх подальшу доставку до призначених адресатів.

Магістральні канали у схемі виконують функцію основних транспортних шляхів, за допомогою яких здійснюється передавання критично важливої інформації. Вони будуються на базі діапазонів з високою дальністю або на основі висотних ретрансляторів і часто дублюються резервними маршрутами, які активуються у випадку деградації основного каналу. Резервування є важливою властивістю мережі, оскільки дозволяє зберігати стабільність зв'язку в умовах активних перешкод, пошкодження інфраструктури або зміни положення мобільних платформ.

Структурна схема демонструє багаторівневу взаємодію між діапазонами: високочастотні канали забезпечують локальне високошвидкісне передавання даних, середньочастотні — середні дистанції та мобільність, тоді як низькочастотні кластери формують загальний каркас мережі. Перехід між цими діапазонами здійснюється завдяки вузлам-шлюзам, що створює цілісну ієрархію взаємодії. Така архітектура дозволяє моделювати складні тактичні сценарії, у яких різні типи вузлів виконують взаємодоповнювальні функції та забезпечують живучість мережі навіть у випадку втрати частини інфраструктури.

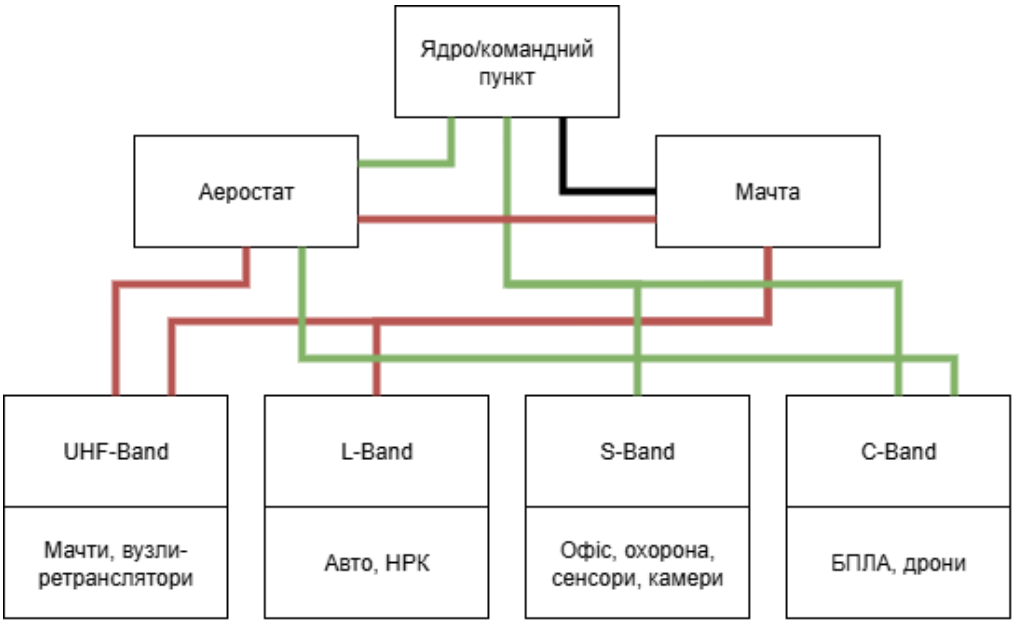


Рис. 3.4 Структурна конфігурація мережі

3.7. Алгоритм оцінювання прийнятого сигналу та керування напрямком антени

Алгоритм оцінювання прийнятого сигналу й автоматичного керування напрямком антени є одним із ключових компонентів побудованої мережевої моделі, оскільки він визначає стабільність радіоканалу та забезпечує можливість адаптивної реакції вузла на зміни середовища. У тактичних умовах, де можливі різкі перепади рівня сигналу, зміни положення вузлів, поява рухомих перешкод та флуктуації спектральної обстановки, система повинна не лише вимірювати параметри каналу, але й активно коригувати свою поведінку для збереження якості зв’язку. У запропонованому рішенні фізичний рівень об’єднано з механізмами маршрутизації та керування антеною в єдину замкнену систему, яка працює циклічно й автономно.

Першим етапом алгоритму є зчитування параметрів сигналу. Основні величини, що використовуються в модулі, — це RSSI, SNR, SINR та запас за затуханням (fade margin). Вони вимірюються у реальному часі та формують матрицю параметрів, на основі якої алгоритм приймає рішення. Наведений нижче код демонструє узагальнену структуру циклу збору даних:

```
def read_signal_parameters(samples=20):
    rssi_values = []
    snr_values = []
    sinr_values = []

    for _ in range(samples):
        rssi = виміряти_RSSI()
        snr = виміряти_SNR()
        sinr = виміряти_SINR()
```

```
        if rssi is not None:
            rssi_values.append(rssi)
        if snr is not None:
            snr_values.append(snr)
        if sinr is not None:
            sinr_values.append(sinr)

    avg_rssi = середнє(rssi_values)
    avg_snr = середнє(snr_values)
    avg_sinr = середнє(sinr_values)

    return avg_rssi, avg_snr, avg_sinr
```

Функція працює за принципом збирання «коротких вибірок», що дозволяє згладити нестабільність сигналу. Під час тестування аналогічна логіка застосовувалась у модулі, де RSSI фіксується як максимальне значення з кожної серії вимірів, що дозволяє мінімізувати вплив шуму. У дипломній роботі цей підхід є корисним, оскільки він нагадує методику, застосовану в інженерних польових вимірюваннях, коли замість одиничних значень використовують сукупні оцінки.

Для формалізації оцінки якості каналу використовуються такі співвідношення:

$$□□□ = □_{□□□□□□} - □_{□□□□□}$$
$$□□□ = □_{□□□□□□} - 10□□□_{10}(□ + □)$$

де I — потужність завад, а N — рівень шуму.

У практичній системі ці величини дістаються з низькорівневих модулів приймача, проте в алгоритмі їх можна розглядати як вхідні параметри.

Fade margin визначається як:

$$\square = \square_{\square\square} - \square_{\square\square\square}$$

де P_{rx} — поточний рівень прийому, а P_{min} — мінімальне значення, що дозволяє зберігати зв’язок без помилок.

Окремою частиною алгоритму є аналіз тренду зміни параметрів. Вузол зберігає історію останніх вимірів та визначає характер змін: стабільний рівень, спад, різке падіння або хаотичну поведінку. В прикладі нижче показано узагальнену логіку такої оцінки:

```
def evaluate_trend(history):
    if len(history) < 5:
        return "unknown"

    slope = history[-1] - history[-5]

    if slope > 3:
        return "improving"
    elif slope < -3:
        return "degrading"
    else:
        return "stable"
```

Така логіка дозволяє системі передбачати майбутні зміни, реагуючи ще до того, як зв’язок стане критично слабким.

Наступним етапом роботи модуля є визначення напрямку на віддалений вузол. Для цього використовують або методи фазового аналізу, або просту стратегію покрокового сканування секторів. У випадку механічних систем алгоритм перебирає кут наведення та вимірює рівень сигналу.

```
def find_best_angle(angle_range):
    best_angle = None
    best_value = -999

    for angle in angle_range:
        встановити_кут(angle)
        level = виміряти_RSSI()

        if level > best_value:
            best_value = level
            best_angle = angle

    return best_angle, best_value
```

Якщо пристрій підтримує фазовані решітки, функція зміни кута замінюється на зміну фазових коефіцієнтів, але алгоритмічна логіка залишається такою ж. Після визначення оптимального напрямку система повертає антену на знайдений кут і проводить повторний цикл вимірювань, щоб переконатися у покращенні зв’язку.

Алгоритм реакції на погіршення якості каналу має кілька рівнів реагування:

1. Компенсація за рахунок наведення антени де система намагається покращити напрям:

```
def optimize_direction():
    avg_rssi, avg_snr, avg_sinr = read_signal_parameters()
    trend = evaluate_trend(RSSI_history)

    if trend == "degrading":
        angle, value = find_best_angle(range(0, 360, 5))
        встановити_кут(angle)
```

2. Перевірка після компенсації:

```
if new_rssi < old_rssi:
    reroute()
```

Механічне наведення реалізується через керування приводом:

```
def set_angle(angle):
  двигун.поворот(angle)
```

Електронне наведення — через фазову перебудову:

```
def electronic_steer(angle):
  фазові_коефіцієнти = обчислити_масив(angle)
  застосувати_коефіцієнти(фазові_коефіцієнти)
```

Обидві процедури формально еквівалентні: вони змінюють напрям максимуму діаграми спрямованості антени.

Описаний алгоритм становить комплексний механізм адаптивного керування радіоканалом, у якому оцінювання параметрів сигналу, визначення напряму приходу та процедури фізичного й логічного коригування об'єднані в єдину функціональну систему. Поєднання виміряних параметрів RSSI, SNR, SINR та запасу за затуханням із механізмами пошуку оптимального напряму антени забезпечує можливість своєчасного реагування на погіршення умов поширення, появу завад, зміни просторового положення вузлів та інші фактори, характерні для тактичних мереж. Інтеграція описаних процесів із модулем маршрутизації дозволяє не лише оптимізувати приймальні характеристики окремого вузла, але й забезпечити автоматичний перехід на альтернативні маршрути у разі, коли фізичне коригування не призводить до покращення зв’язку. Така взаємодія фізичного та мережевого рівнів створює цілісний адаптивний контур управління зв’язком,

здатний підтримувати стабільність і працездатність мережі навіть за умов інтенсивної мобільності, радіоелектронних перешкод або часткової втрати топологічної структури. Саме завдяки цим властивостям алгоритм може розглядатися як універсальний компонент для систем, що функціонують у складному й динамічному середовищі.

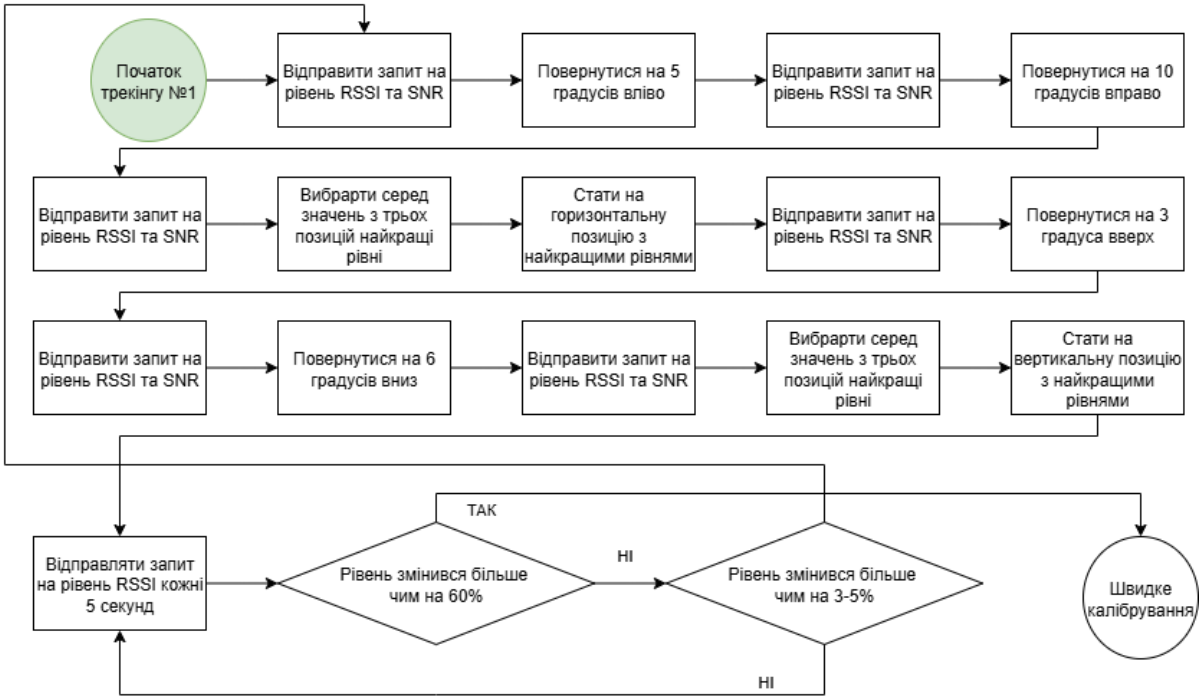


Рис. 3.5 Блок-схема алгоритму оцінки та керування антеною

3.8. Програмний модуль аналізу покриття й розрахунку дальності

Розроблений програмний модуль оперативної оцінки радіопокриття покликаний забезпечити інженера швидким засобом прогнозування можливостей зв’язку в польових умовах. Його завдання полягає у визначенні очікуваного рівня прийнятого сигналу на різних дистанціях, оцінці запасу за затуханням, розрахунку співвідношення сигнал–шум та визначенні робочого режиму модуляції відповідно до розрахованого SNR. На відміну від універсальних планувальників мереж, модуль налаштований саме на сценарії тактичного та децентралізованого зв’язку,

де обладнання працює в умовах змішаної топології, різних висот антен та складного середовища поширення хвиль.

Основою розрахунків є фізичні моделі поширення радіохвиль. Для загального випадку втрати на трасі визначаються формулою:

$$□□ = 20□□□_{10}(□) + 20□□□_{10}(□) − 147.55,$$

яка використовується як нижня межа для порівняння. Реальні умови коригуються степеневими моделями виду:

$$□□ = □□(□_0) + 10□□□□_{10}(\frac{□}{□_0}),$$

де n — показник середовища (від 2 для відкритої місцевості до 3.5–4 для щільної міської забудови). Для тактичних сценаріїв, які передбачають роботу поблизу землі, у транспорті або на пересіченій місцевості, значення
n звичайно перевищує 2.2–2.6, що модуль враховує під час обчислень.

Окремо застосовується оцінка зони Френеля, що має значний вплив у випадках, коли антени працюють на відносно низьких висотах. Радіус першої зони визначається виразом:

$$□_1 = \sqrt{\frac{□□_1□_2}{□_1+□_2}},$$

а її часткове перекриття додає до втрат додатковий штраф, який у практиці зазвичай становить 4–6 дБ. Програмний модуль автоматично застосовує корекцію у випадках, коли обчислений радіус перевищує видиму висоту траси.

Рівень прийнятого сигналу обчислюється як:

$$□_{□□} = □_{□□} + □_{□□} + □_{□□} − □□ − □_{□□□} − □_{□□□},$$

де L_{pol} — втрати через невідповідність поляризацій, які можуть досягати 20–25 дБ у разі ортогональних антен.

Таке подання дозволяє чітко оцінити внесок кожного елемента тракту та визначити, які параметри мають найбільший вплив на дальність.

Щоб надати не лише числове значення потужності сигналу, модуль додатково обчислює співвідношення сигнал–шум:

$$□□□ = □_{□□} − □_{0},$$

де N_0 — шумовий поріг приймача, який залежить від ширини каналу. З огляду на це, модуль автоматично визначає, чи дозволяє обчислений SNR застосувати відповідну модуляцію. Така логіка наближена до принципів стандартів Wi-Fi, безпровідних модемів та SDR-систем.

Для кращого розуміння інженерної структури алгоритму наведемо узагальнений фрагмент коду, який відображає логіку розрахунку дальності:

```
freq = user_input.frequency
tx_power = user_input.power
distance = user_input.distance

path_loss = 20*log10(distance) + 20*log10(freq) - 147.55
path_loss += environment_correction
path_loss += fresnel_penalty

prx = tx_power + tx_gain + rx_gain - path_loss - cable_losses
snr = prx - noise_floor(bandwidth)

if snr >= mcs_threshold(mcs):
   choose mcs
else:
```

reduce modulation

У тактичних задачах такий інструмент має особливу цінність, адже дозволяє інженеру швидко визначити, чи підходить конкретний набір обладнання для зв’язку між автомобільними платформами, БПЛА, аеростатом або віддаленим опорним пунктом. Крім того, модуль надає можливість оцінити, наскільки збільшення висоти антени або зміна частоти впливає на покриття, що спрощує вибір оптимального сценарію розміщення станцій.

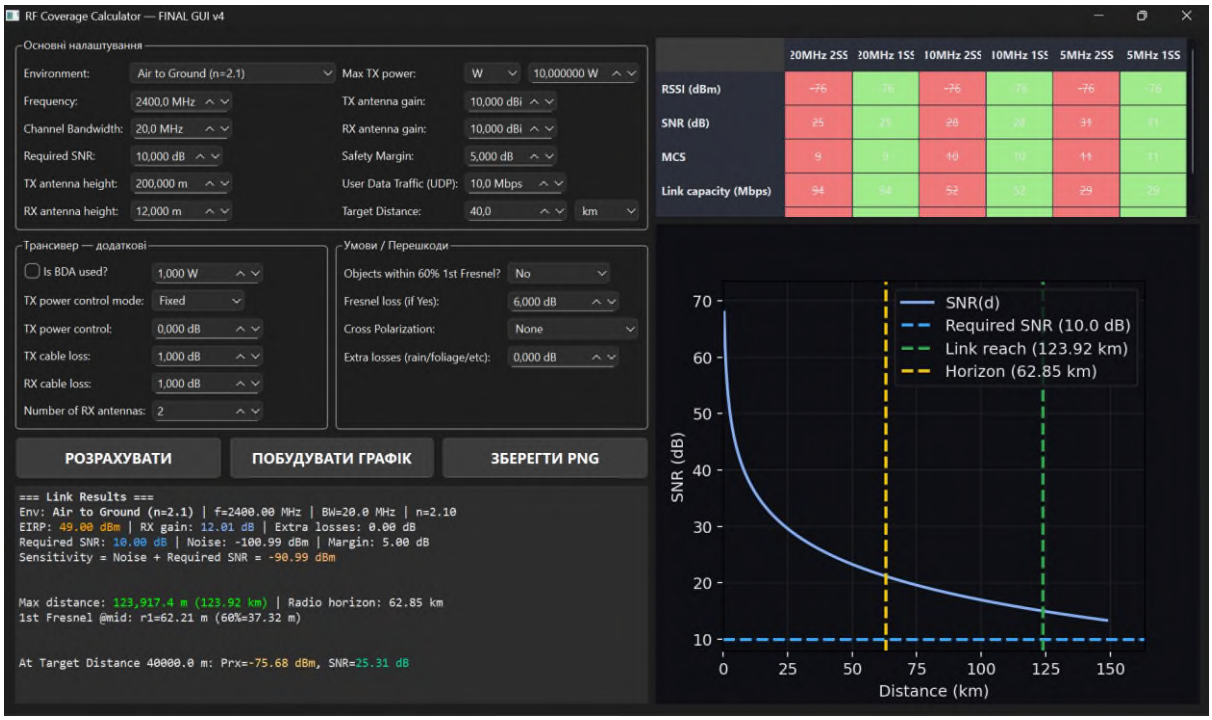


Рис. 3.6 Приклад розрахунку покриття

3.9. Інструмент для вимірювання характеристик антен

Для практичної оцінки антен, що застосовуються у запропонованій мережевій архітектурі, було розроблено програмний інструмент вимірювання їхніх характеристик. Основна мета цього інструмента полягає у побудові діаграм спрямованості та кількісному аналізі таких параметрів, як коефіцієнт підсилення, ширина головної пелюстки, рівень бічних пелюсток та асиметрія випромінювання.

Отримані дані безпосередньо використовуються для уточнення моделей покриття та коригування алгоритмів керування напрямком антени, описаних у попередніх підрозділах.

Система вимірювань передбачає послідовне зняття рівня сигналу при різних кутових положеннях антени. У найпростішому випадку тестова антена розміщується на поворотному стенді, який дозволяє змінювати азимут із фіксованим кутовим кроком (наприклад, 5° або 10°). На кожному положенні виконується серія вимірів RSSI, після чого значення усереднюються для зменшення впливу випадкових флуктуацій. Узагальнену логіку цього процесу можна подати таким фрагментом коду:

```
import math
import statistics

def measure_pattern(angles_deg):
    results = []
    for angle in angles_deg:
        set_antenna_angle(angle)
        samples = []
        for _ in range(20):
            rssi = read_rssi()
            if rssi is not None:
                samples.append(rssi)
        if samples:
            avg_rssi = statistics.mean(samples)
            results.append((angle, avg_rssi))
    return results
```

Отриманий набір пар «кут – рівень» піддається нормуванню відносно максимального значення, що дозволяє побудувати діаграму спрямованості у

відносних одиницях (дБ від максимуму). На основі нормованих значень визначається ширина головної пелюстки на рівні –3 дБ (Half Power Beam Width, HPBW). Для цього алгоритм виявляє ділянку, де значення рівнів знаходяться вище порогового рівня (–3 дБ від максимуму), і обчислює відповідну кутову ширину:

```
def normalize_pattern(results):
    max_rssi = max(r for _, r in results)
    norm = [(ang, r - max_rssi) for ang, r in results]
    return norm

def estimate_hpbw(norm_pattern):
    above = [ang for ang, val in norm_pattern if val >= -3.0]
    if not above:
        return 0.0
    return max(above) - min(above)
```

Таким чином, інструмент не лише будує діаграму, а й автоматично виводить числові параметри, придатні для порівняння різних антен.

Графічна частина інструмента передбачає формування як декартових, так і полярних діаграм. У декартовому вигляді зручно аналізувати симетрію та форму головної пелюстки, у полярному — інтуїтивно оцінювати повну картину випромінювання. Побудова полярної діаграми може бути реалізована через трансформацію кутів у радіани та передавання масиву нормованих значень у функції побудови графіків:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math

def plot_polar(norm_pattern):
    angles_rad = [math.radians(ang) for ang, _ in norm_pattern]
```

```
values_db = [val for _, val in norm_pattern]

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection="polar")
ax.plot(angles_rad, values_db)
ax.set_theta_zero_location("N")
ax.set_theta_direction(-1)
ax.set_rlabel_position(135)
plt.show()
```

На основі таких діаграм можливо оцінити рівень бічних пелюсток, наявність провалів у певних напрямках, асиметрію випромінювання та співвідношення front–back, що є важливим для тактичних конфігурацій, де небажане випромінювання у тил може бути критичним. При наявності опорної антени з відомим коефіцієнтом підсилення інструмент може використовуватись і для відносної оцінки абсолютного підсилення тестованої антени шляхом порівняння пікових рівнів сигналу.

Принцип роботи тестових вимірювань органічно пов’язаний із алгоритмом наведення антени за максимальним значенням RSSI. Практично, дані, отримані за допомогою вимірювального інструмента, дозволяють перевірити, наскільки добре алгоритм трекінгу використовує реальну діаграму спрямованості. Наприклад, відома ширина головної пелюстки визначає крок, з яким доцільно змінювати кут під час пошуку максимуму, а інформація про бічні пелюстки дозволяє налаштовувати порогові значення для уникнення хибних максимумів.



Рис. 3.7 Інструмент для вимірювання характеристик антен

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було здійснено комплексне дослідження принципів побудови, оптимізації та практичної реалізації мобільних самоорганізованих мереж (MANET), орієнтованих на використання в умовах тактичних, динамічних та інфраструктурно обмежених сценаріїв. Метою роботи було сформувати універсальну мережеву модель, здатну охоплювати різні режими функціонування — від високої мобільності та нерівномірного розподілу вузлів до змішаного частотного плану та багаторівневої структури взаємодії між сегментами мережі. Досягнуті результати дозволяють розглядати розроблену модель як практичний інструмент для планування, тестування та аналізу сучасних тактичних систем зв’язку.

У першому розділі було здійснено всебічний теоретичний аналіз фундаментальних властивостей мобільних децентралізованих мереж. Детально розглянуто поняття самоорганізації, особливості побудови маршрутів, механізми відсутності централізованого керування та наслідки динамічності топології. Проаналізовано еволюцію концепції MANET від перших військових проєктів і packet-radio систем до сучасних багаторівневих платформ із підтримкою гібридних технологій доступу та інтеграцією із сенсорними і супутниковими системами. Особливу увагу приділено проблемам масштабування, перевантаження вузлів, нестабільності каналів та впливу характеристик радіосередовища — чинникам, що визначають обмеження реальних MANET-мереж. На підставі огляду сучасних викликів сформовано перелік ключових факторів, що впливають на якість зв’язку: висота антен, тип місцевості, обраний діапазон, структура завад, параметри антен та відповідність моделі поширення хвиль фактичним умовам.

Другий розділ було присвячено алгоритмічним і аналітичним методам оптимізації мережевих структур. Розглянуто класи маршрутизаційних алгоритмів, оцінено їхню працездатність у динамічних умовах та наведено метрики ефективності — затримку, пропускну здатність, обсяг службового трафіку і стійкість до змін топології. Досліджено методи аналітичної оптимізації радіомереж: моделі затухання, корекції на рельєф та середовище, вибір частотного

плану, оптимізація потужності та ширини каналу. Окрему увагу приділено мурашиним алгоритмам (ACO), які показують потенційну перевагу над класичними протоколами в умовах високомобільних сценаріїв. Додатково розроблено підхід до комбінованої оцінки маршрутів з урахуванням RSSI, SNR, hop-count та навантаження ключових вузлів, що дозволяє обирати найбільш стабільні маршрути в умовах нерівномірного розподілу трафіку. Розглянуто можливості керування діаграмою спрямованості антен, зокрема методи вимірювання напрямку прийому сигналу, принципи механічного та електронного наведення та способи інтеграції цих механізмів зі стратегіями маршрутизації.

У третьому розділі було представлено розроблену універсальну мережеву модель, що об’єднує в єдину структуру різнорідні сценарії застосування: автомобільні та роботизовані платформи, стаціонарні пости, офісні вузли, висотні ретранслятори, лінії магістрального зв’язку та БПЛА. Обґрунтовано вибір частотних діапазонів (L-band, S-band, UHF, C-band, 5.8 GHz), що забезпечують різний баланс дальності, стабільності та пропускної здатності. Побудовано параметричну таблицю вузлів, яка охоплює радіотехнічні, топологічні та мобільні характеристики обладнання. На основі цих параметрів виконано кластеризацію мережі за частотною, фізичною та функціональною ознаками з виділенням міжкластерних шлюзів і визначенням ролі високорівневих вузлів (командний центр, аеростат). Сформовано структурну схему мережевої конфігурації, що описує взаємодію вузлів, резервні маршрути та логіку передачі даних між сегментами.

Розроблений алгоритм оцінювання прийнятого сигналу та керування напрямком антени поєднує фізичний рівень моніторингу якості сигналу (RSSI, SNR, fade margin) з адаптивним наведенням антени, що дозволяє підтримувати оптимальний рівень зв’язку в умовах руху, завад чи тимчасових перешкод. Алгоритм інтегровано з маршрутизатором, що робить можливим автоматичний вибір нового маршруту у випадку, коли фізичне коригування антени не забезпечує поліпшення каналу. Додатково реалізовано програмний модуль прогнозування покриття та розрахунку дальності, який використовує класичні моделі FSPL,

логнормального затінення, Хата та оцінку зони Френеля для визначення граничних дистанцій зв’язку. У поєднанні з вимірювальним інструментом характеристик антен (діаграми спрямованості, HPBW, рівень бокових пелюсток) це дає можливість комплексно оцінювати вплив фізично виміряних параметрів на реальні можливості мережі.

Сукупність проведених досліджень підтвердила, що побудова тактичної багаточастотної MANET-мережі потребує одночасного врахування алгоритмічних, топологічних та радіотехнічних аспектів. Запропоновані методи дозволяють підвищити стійкість мережі до змін середовища, зменшити перевантаження ключових вузлів, оптимізувати маршрутизацію та забезпечити стабільну роботу навіть за умов високої мобільності та обмеженої інфраструктури. Розроблена модель може бути використана як у реальних системах тактичного зв’язку, так і як базова платформа для подальших досліджень, модернізації алгоритмів та впровадження нових методів оптимізації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Perkins C. E. Ad Hoc Networking. Addison-Wesley, 2001.
2. Corson S., Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. IETF RFC 2501, 1999.
3. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). IETF RFC 3626, 2003.
4. Johnson D., Maltz D., Hu Y. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks. IETF RFC 4728, 2007.
5. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF RFC 3561, 2003.
6. Akyildiz I. F., Wang X. A Survey on Wireless Mesh Networks. IEEE Communications Magazine, 2005.
7. Gupta P., Kumar P. R. The Capacity of Wireless Networks. IEEE Transactions on Information Theory, 2000.
8. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. IEEE HICSS, 2000.
9. Dorigo M., Di Caro G. The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. Springer, 1999.
10. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall, 2002.
11. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
12. Molisch A. Wireless Communications. Wiley, 2011.
13. Okumura Y., Ohmori E., Fukuda K. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Service. Review of the Electrical Communication Laboratory, 1968.
14. Hata M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980.
15. ITU-R P.525-4. Free-Space Propagation Model. International Telecommunication Union, Geneva, 2019.

16. ITU-R P.1812. Propagation Data and Prediction Methods for Terrestrial Line-of-Sight Systems. International Telecommunication Union, 2021.
17. ITU-R P.833. Attenuation in Vegetation. International Telecommunication Union, 2020.
18. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Prentice-Hall, 2001.
19. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005.
20. Caleffi M., Paura L. Optimized Routing in Mobile Ad Hoc Networks via Ant Colony Optimization. Lecture Notes in Computer Science, 2007.
21. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley, 2016.
22. Kraus J. D. Antennas. McGraw-Hill, 1988.
23. Mailloux R. Phased Array Antenna Handbook. Artech House, 2005.
24. Gomez C., Paradells J. Wireless Propagation Modeling for Simulation of Sensor Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007.
25. Singh G., Sharma S. Coverage Prediction Models for Tactical Communication Systems. Defence Science Journal, 2020.
26. Корнієнко В.І., Гусєв О.Ю., Герасіна О.В. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів у системах керування, кібербезпеки, телекомунікацій

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ