

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження протоколів бездротових мереж для
підвищення їхньої масштабованості та надійності»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерної інженерії
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
(назва)

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

(підпис)

Євгеній Ковшуненко
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:	здобувач(ка) вищої освіти гр. КІД-42 _____ Ковшуненко Євгеній Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: науковий ступінь, вчене звання	_____ Владислав Сосновий Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: науковий ступінь, вчене звання	_____ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра 123 Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 123 Комп'ютерної інженерії

Освітньо-професійна програма Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру Наталія ЛАЩЕВСЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«_____» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ковшуненко Євгеній Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження протоколів бездротових мереж для підвищення їхньої масштабованості та надійності.

2. Керівник кваліфікаційної роботи Владислав Сосновий,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від
«27» лютого 2024р. № 36

3. Строк подання кваліфікаційної роботи «3» червня 2024р.

4. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література, пов'язана з дослідженням ефективності методів масштабування бездротових мереж, просторове мультиплексування, Beamforming,

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Оглянути існуючі протоколи бездротових мереж

2. Розглянути види архітектури бездротових мереж

3. Проаналізувати методи масштабування бездротових мереж

4. На основі аналізу методів масштабування, дослідити їх ефективність

5. Провести теоретичне проектування мережевої моделі на основі отриманих даних

6. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

1. Протоколи бездротових мереж

2. Основні проблеми що впливають на масштабованість бездротових мереж

3. Гексагональна мережева модель

4. Багаторівнева ієрархічна архітектура

5. Модель каналу MIMO

6. Таблиця масштабування параметрів мережі

7. Дата видачі завдання «27» лютого 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	28.02-22.03.2024	Виконано
2	Обробка матеріалу	23.03-24.03.2024	Виконано
3	Розробка теоретичної частини	26.03-28.03.2024	Виконано
4	Аналіз інформації для подальшого дослідження	3.04-8.04.2024	Виконано
5	Опрацювання результатів аналізу	10.04-13.05.2024	Виконано
6	Висновки за результатами аналізу	14.04.2024	Виконано
7	Розробка презентації	15.04.2024	Виконано
8	Передзахист	17.04.2024	Виконано

Здобувач(ка) вищої освіти

(підпис)

Євгеній Ковшуненко

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Владислав Сосновий

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 54 стор., 10 рис., 2табл., 30 джерел.

Мета роботи – встановити ключові фактори, що впливають на масштабованість та надійність протоколів бездротових мереж, і визначити способи їх оптимізації

Об'єкт дослідження – мережі, що використовують бездротові технології для передачі даних.

Предмет дослідження – протоколи бездротового зв'язку (Wi-Fi, LTE, 5G), їх характеристики, проблеми масштабованості та надійності, а також фактори, що впливають на їх ефективність.

Короткий зміст роботи: Були розглянуті основні бездротові протоколи, такі як Wi-Fi, ZigBee, та LTE з 5G. Також в даній роботі було проаналізовано методи масштабування бездротових однорівневих та багаторівневих мереж. Також дослідницьким шляхом було доведено ефективність гексагональної бездротової сітчастої мережі, яка використовує технології просторового мультиплексування, ортогональної взаємодії та Beamforming .

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Бездротові протоколи, масштабування, mesh-мережа, мультиплексування, Wi-Fi, , багаторівнева архітектура.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
Розділ 1. ОГЛЯД БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ.....	10
1.1 Історія розвитку бездротових мереж.....	10
1.2 Основні принципи бездротового зв'язку.....	12
1.2.1 Частотний спектр.....	12
1.2.2 Модуляція сигнал.....	13
1.3 Види архітектури бездротових мереж.....	17
1.3.1 Однорангова архітектура.....	17
1.3.2 Ієрархічна мережева архітектура.....	19
1.3.3 Хмарна мережева архітектура.....	22
1.4 Протоколи бездротових мереж.....	24
1.4.1 Wi-Fi.....	24
1.4.2 LTE та 5G.....	26
1.4.3 ZigBee.....	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРОБЛЕМ В ЇХ АРХІТЕКТУРІ.....	30
2.1 Фактори, що обмежують масштабованість одношарових сітчастих мереж...30	
2.1.1 Модель мережі.....	30
2.1.2 Модель передачі.....	31
2.1.3 Аналіз пропускної здатності одношарових сіткових мереж.....	33
2.1.4 Нижня межа швидкості передачі.....	34
2.1.5 Кількість інтерферуючих комірок.....	34
2.1.6 Кількість потоків даних, які передає кожен вузол.....	35
2.1.7 Закон масштабування пропускної здатності.....	36
2.1.8 Ключові фактори, що обмежують масштабованість.....	36
2.2 Дизайн архітектури для mesh-мереж.....	37
2.2.1 Розуміння архітектурного дизайну.....	38

2.3 Проектування архітектури.....	40
2.3.1 Розподіл вузлів.....	40
2.3.2 Масштабування параметрів мережі.....	41
2.3.3 Політика максимальної маршрутизації з D-стрибками.....	43
2.4 Досяжна пропускна здатність на вузол для багатошарової сіткової мережі...	45
2.4.1 Пропускна здатність на вузол	45
2.4.2 Схема передачі даних.....	46
2.4.3 Досяжна пропускна здатність на вузол.....	48
2.4.4 Просторове мультиплексування.....	49
2.4.5 Формування променя (Beamforming).....	54
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ МАСШТАБУВАННЯ.....	58
3.1 Умови масштабованості для багатошарової сіткової мережі.....	58
3.1.2 Умови масштабованості для просторового мультиплексування.....	58
3.1.3 Умови масштабованості для формування променя.....	59
3.1.4 Роз'яснення щодо масштабованості сітчастих мереж.....	60
3.2 Моделювання масштабованості багатошарової сіткової мережі.....	61
Висновки.....	64
Список використаних джерел.....	65
Демонстраційні матеріали.....	68

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми та її актуальність: У сучасному світі бездротові мережі відіграють ключову роль у забезпеченні постійного та швидкого доступу до інтернету та зв'язку між пристроями. З розвитком технологій і зростанням кількості підключених пристроїв виникає необхідність у підвищенні масштабованості та надійності цих мереж. Бездротові технології, такі як Wi-Fi, LTE та 5G, є критично важливими для реалізації цих вимог.

Проте існуючі технології бездротового зв'язку часто стикаються з проблемами, такими як інтерференція, обмежена пропускна здатність, перешкоди навколишнього середовища та інші фактори, що впливають на їх ефективність. Аналіз та оптимізація мережевих бездротових протоколів є ключовими для забезпечення ефективної роботи мереж у різних умовах експлуатації.

Для усунення проблем масштабування бездротових мереж пропонується теоретично дослідити ефективність гексагональної багаторівневої бездротової mesh-мережі. Ця структура має потенціал для значного покращення масштабованості та відмовостійкості, що робить її перспективним напрямом досліджень у галузі бездротових комунікацій.

Об'єктом дослідження являються мережі, що використовують бездротові технології для передачі даних.

Предметом дослідження є протоколи бездротового зв'язку, їх характеристики, проблеми масштабованості та надійності, а також фактори, що впливають на їх ефективність.

Метою роботи є встановлення ключових факторів, що впливають на масштабованість та надійність бездротових протоколів, і визначення способів їх оптимізації.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ

Бездротові мережі - це системи передачі даних, що використовують електромагнітні хвилі замість фізичних кабелів. Ці мережі надають можливість користувачам підключатися до інтернету або інших мереж з будь-якої точки покриття, забезпечуючи мобільність і гнучкість. Завдяки таким перевагам бездротові мережі широко використовуються в повсякденному житті, бізнесі та промисловості.

1.1 Історія розвитку бездротових мереж

Бездротові мережі мають багатогранну історію, яка бере початок з кінця 19-го століття. Початкові дослідження у цій галузі були спрямовані на розвиток радіо технологій, що заклало фундамент для майбутнього розвитку бездротових мереж.

У 1895 році італійський інженер Гульєльмо Марконі успішно продемонстрував передачу бездротового сигналу на відстань декількох кілометрів, що стало першим кроком у створенні бездротових комунікацій.[28] Його робота привела до розробки радіотелеграфії, яка згодом стала основою для морських і військових комунікацій.

У 1940-х роках з'явилися перші спроби створення бездротових мереж для військових цілей, зокрема радіомережі для координації військових дій під час Другої світової війни. Після бойових дій ці технології поступово проникли у цивільний сектор.

У 1991 році компанія NCR Corporation, разом з AT&T, розробила першу комерційну версію бездротової мережі під назвою WaveLAN, яка забезпечувала швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с. Ця технологія стала основою для подальшого розвитку стандарту IEEE 802.11.

У 1997 році Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) затвердив перший стандарт бездротових локальних мереж - IEEE 802.11. Він

забезпечував швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с і працював у діапазоні 2.4 ГГц.

У 1999 році був прийнятий стандарт 802.11b, який значно покращив швидкість передачі даних до 11 Мбіт/с. Цей стандарт став популярним завдяки доступності і простоті використання, що сприяло масовому впровадженню Wi-Fi у будинках і офісах.

У 2003 році з'явився стандарт 802.11g, який забезпечував швидкість до 54 Мбіт/с, а у 2009 році був прийнятий стандарт 802.11n, що дозволяв досягати швидкості до 600 Мбіт/с завдяки використанню множинних антен (MIMO).

Стандарт 802.11ac, прийнятий у 2013 році, забезпечував швидкість до 1.3 Гбіт/с, а найновіший стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6), прийнятий у 2019 році, дозволяє досягати швидкостей до 9.6 Гбіт/с з покращеною ефективністю та надійністю, особливо в умовах великої кількості підключених пристроїв.

Паралельно з розвитком Wi-Fi, мобільні бездротові мережі також зазнали значного прогресу. Починаючи з аналогових мереж першого покоління (1G) у 1980-х роках, до сучасних мереж п'ятого покоління (5G), мобільні мережі забезпечували все більшу швидкість передачі даних та покращену якість зв'язку.

Аналогові мобільні мережі першого покоління, які з'явилися у 1980-х роках, забезпечували базові голосові комунікації. Цифрові мережі другого покоління (2G), які з'явилися у 1990-х роках, додали можливість передачі текстових повідомлень (SMS) і базових даних. Третє покоління мобільних мереж (3G), яке з'явилося у 2000-х роках, дозволяло передавати дані з більш високою швидкістю, що зробило можливим мобільний інтернет та мультимедійні послуги. Мережі четвертого покоління (4G), які з'явилися у 2010-х роках, забезпечували значно вищі швидкості передачі даних, дозволяючи використовувати потокове відео, онлайн-ігри та інші ресурсоемні застосунки. Сучасне п'яте покоління мобільних мереж (5G), яке почало впроваджуватися у 2020-х роках, обіцяє ще більші швидкості, низьку затримку та можливість підключення великої кількості пристроїв, що відкриває нові можливості для Інтернету речей (IoT) та інших інноваційних технологій.[30]

1.2 Основні принципи бездротового зв'язку

1.2.1 Частотний спектр

Частотний спектр є основою для бездротового зв'язку, оскільки він визначає, які частоти використовуються для передачі даних. Вся передача даних через бездротові мережі відбувається за допомогою радіохвиль, які поділяються на різні частотні діапазони. Частотний спектр розподіляється і регулюється урядовими органами в кожній країні для забезпечення ефективного і безпечного використання радіочастот.

Існують наступні частотні діапазони:

- Низькочастотні діапазони (30 кГц – 3 МГц) використовуються переважно для довгохвильового радіомовлення та навігаційних систем. Низькочастотні хвилі мають великий радіус дії і можуть проникати через тверді перешкоди, але мають обмежену пропускну здатність трафіка.
- Високочастотні діапазони (3 МГц – 30 МГц) використовуються для короткохвильового радіомовлення, авіаційного та морського зв'язку. Високочастотні хвилі можуть відбиватися від іоносфери, дозволяючи реалізувати зв'язок на великих відстанях, але дані частоти схильні до впливу атмосферних умов.
- Ультрависокочастотні діапазони (300 МГц – 3 ГГц) вони широко використовуються для телебачення, мобільного зв'язку, Wi-Fi, Bluetooth та інших бездротових технологій. Ці хвилі мають менший радіус дії порівняно з низькочастотними, але забезпечують високу пропускну здатність.
- Надвисокочастотні діапазони (3 ГГц – 30 ГГц) переважно використовуються для супутникового, мікрохвильового зв'язку та нових технологій, таких як 5G. Вони забезпечують дуже високу пропускну здатність, але мають обмежений радіус дії і майже не проходять через тверді перешкоди.
- Міліметрові хвилі (30 ГГц – 300 ГГц) є частотами, що використовуються в новітніх бездротових технологіях. Міліметрові хвилі мають надвисоку пропускну здатність, але обмежений радіус дії, через те що

сигнал розсіюється навіть на невеликій відстані у атмосфері.

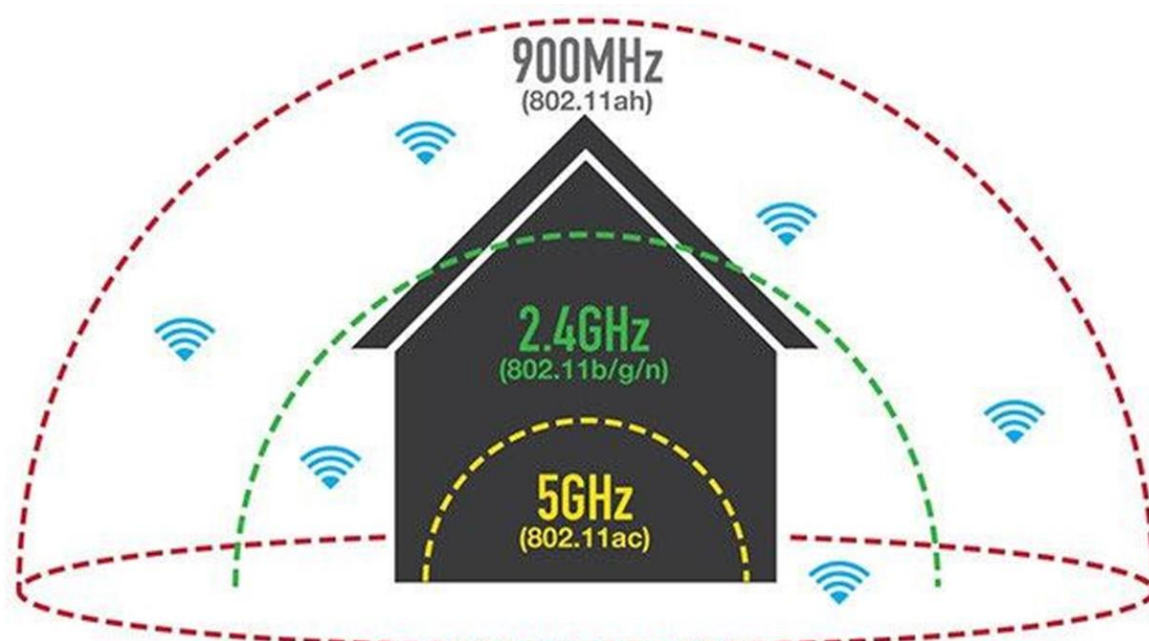


Рис. 1.1 Діапазони частот і їх зони покриття

1.2.2 Модуляція сигнал

Модуляція є ключовим процесом в бездротовому зв'язку, що дозволяє передавати дані за допомогою радіохвиль. Суть процесу полягає у зміні характеристик несучої хвилі (таких як амплітуда, частота або фаза) відповідно до інформаційного сигналу. Існує кілька основних методів модуляції, кожен з яких має свої переваги і недоліки, а також специфічні області застосування.

Амплітудна модуляція (АМ) – це спосіб передачі інформації шляхом зміни амплітуди сигналу носія, відповідно до амплітуди повідомлення, яке передається. АМ широко використовується в радіомовленні та телекомунікаціях.

Основні компоненти модуляції:

- Носійний сигнал (Carrier Signal) - це високочастотний сигнал, котрий використовується для передачі інформації. Його частота значно вища, ніж частота сигналу повідомлення.
- Сигнал повідомлення (Modulating Signal): Це сигнал, який містить

інформацію, що передається. Він зазвичай має значно нижчу частоту, ніж носійний сигнал.

- Модуляція в даному методі відбувається так, що амплітуда несучого сигналу змінюється відповідно до амплітуди сигналу повідомлення.

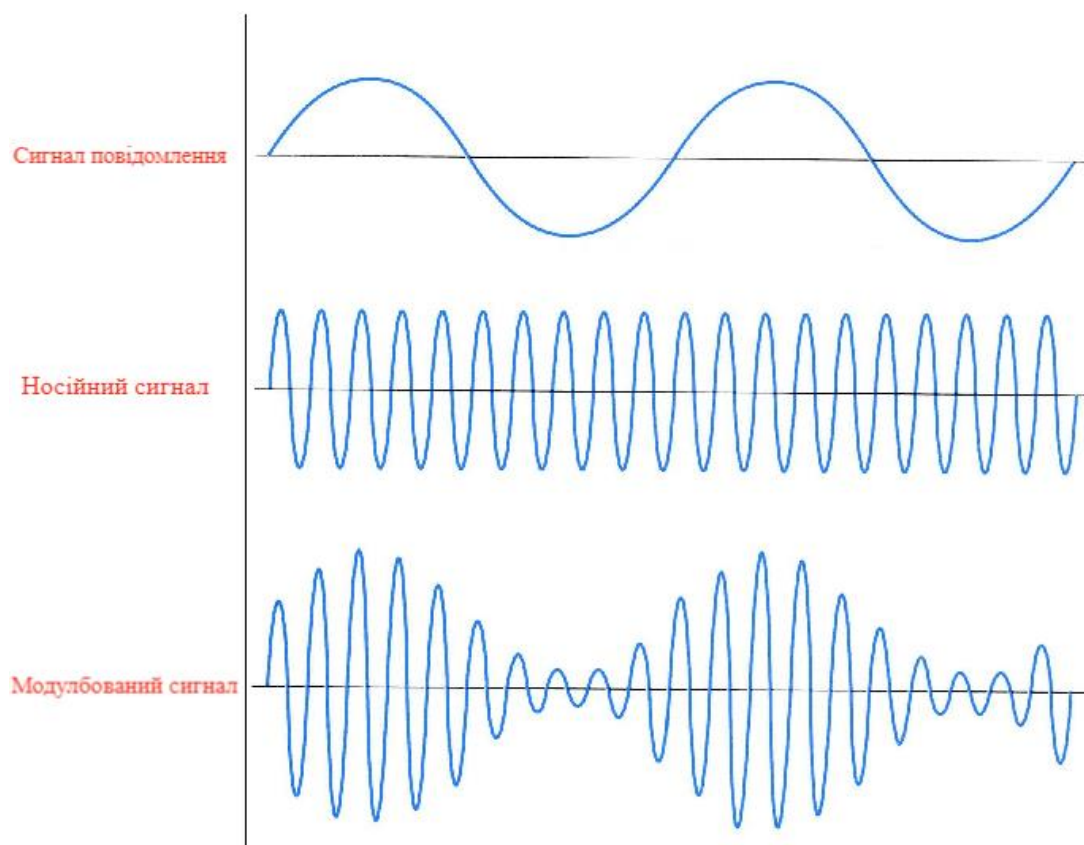


Рис. 1.2 Процес модуляції сигналу

До переваг даного метода можна віднести простоту реалізації, так як це можна зробити використовуючи прості модулятори та демодулятори, які можна зібрати із простих схем.

До недоліків, в свою чергу, можна віднести вкрай високу чутливість до шуму, адже навіть незначні перешкоди, будь то фізичні або частотні хвилі від інших пристроїв, можуть призвести до помилок при демодуляції сигналу, та погане, дуже високе використання частотного спектра.

Амплітудну модуляцію винайшли однією з перших, вона широко використовувалася в радіомовленні, і хоча зараз її застосування скорочується на користь більш сучасних методів, вона все ще, хоч не часто, але використовується у

деяких областях комунікацій, переважно у аматорських приладах.

Фазова модуляція (ФМ) – це метод модуляції, при якому фаза носійного сигналу змінюється відповідно до миттєвого значення сигналу повідомлення.[28]

Модуляція в даному методі відбувається так, що носійний сигнал змінюється пропорційно до сигналу повідомлення.

До переваг такої модуляції можна віднести стійкість до шумів, на відміну від попереднього методу, та більш вузьке використання спектра.

До недоліків можна віднести складність реалізації, бо даний метод потребує більш складних схем модуляції і демодуляції, порівняно з попереднім методом. Також сюди ж можна віднести і те, що в разі наявності багатопроменевого поширення сигналу, можлива поява зсуву фази, що може призводити до його спотворення.

Фазова модуляція широко використовується в бездротових мережах, наприклад, у системах передачі даних, таких як Wi-Fi, 4G, і 5G, а також у супутникових і космічних комунікаціях.

Квадратична амплітудна модуляція (QAM) - це метод модуляції, який поєднує амплітудну і фазову модуляцію для ефективної передачі даних. QAM використовується в багатьох сучасних системах зв'язку, таких як цифрове телебачення, кабельні модеми, і мобільні мережі.[28]

Відмінністю від інших методів є те, що сигнал, що містить інформацію для передачі розділяється на два компоненти: інфазний (I) і квадратурний (Q). Також QAM може мати різну кількість станів, таких як 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, де число передбачає кількість різних можливих комбінацій фаз і амплітуд.

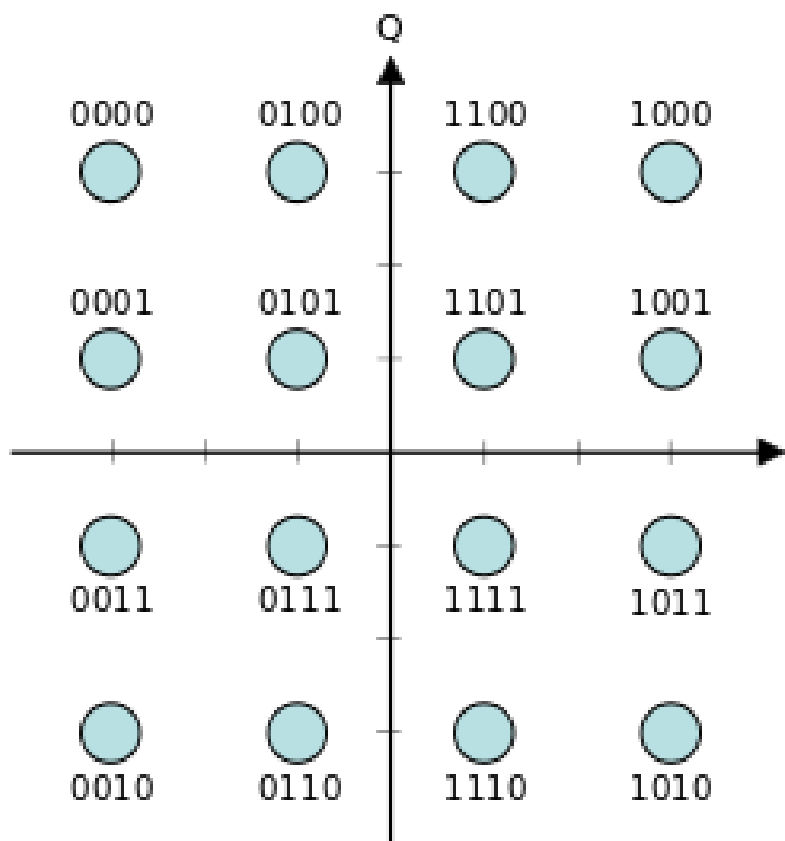


Рис. 1.3 Схема 16-QAM

Модуляція проходить так, що сигнал змінюється згідно з сигналом повідомлення. У QAM сигнал представлений як сума двох ортогональних компонентів.

До переваг даної моделі можна віднести високу швидкість передачі даних, що виходить завдяки використанню декількох станів, а також ефективне використання спектра, так як він може передавати багато даних у одній і тій же смузі пропускання.

QAM широко використовується в сучасних системах зв'язку, включаючи: цифрове телебачення, де використовується для передачі відео і аудіо високої якості; кабельні модеми, для високошвидкісного інтернет-з'єднання через кабельні мережі; у мобільних мережах використовується в стандартах 4G і 5G для забезпечення високої швидкості передачі даних.

1.3 Види архітектури бездротових мереж

1.3.1 Однорангова архітектура

Однорангова (peer-to-peer, P2P) мережева архітектура характеризується відсутністю центрального контролера або сервера. Всі вузли мережі в одноранговій архітектурі є рівноправними і можуть взаємодіяти безпосередньо один з одним. Цей підхід має свої особливості, переваги, недоліки та області застосування.

Однорангові мережі створюються з вузлів, які одночасно можуть виступати, як у ролі клієнта, так і у ролі сервера, обмінюючись ресурсами без необхідності центрального керуючого пристрою. Це дозволяє кожному вузлу, у мережі, ініціювати або відповідати на запити від інших вузлів.

Однорангові мережі мають кілька значних переваг, які роблять їх ефективними для певних типів застосувань. По-перше, вони не мають єдиного критичного вузла, що підвищує надійність і стійкість мережі: вихід з ладу одного або декількох вузлів не призводить до відмови всієї мережі. По-друге, вони відзначаються гнучкістю і масштабованістю, оскільки вузли можуть приєднуватися або відключатись від мережі без значного впливу на її функціонування, що дозволяє легко масштабувати мережу в залежності від потреб. Крім того, пряма взаємодія між вузлами зменшує затримки при передачі даних і підвищує ефективність. Також однорангові мережі дозволяють знизити фінансові витрати, оскільки відсутня необхідність у центральному сервері або контролері.

Однак, незважаючи на ці переваги, дані мережі мають також деякі недоліки, які обмежують їх застосування. Децентралізована структура ускладнює управління і моніторинг мережі, роблячи координацію і контроль ресурсів значним викликом. Відсутність централізованого контролю може призвести до проблем з безпекою, оскільки кожен вузол відповідальний за свою власну безпеку. Крім того, взаємодія рівноправних вузлів може призвести до конфліктів, таких як одночасний доступ до тих самих ресурсів, що може викликати затримки або збої у роботі мережі. Нарешті, при великій кількості вузлів або великому обсязі даних однорангові мережі можуть мати меншу продуктивність порівняно з централізованими

мережами.

Однорангові мережі знаходять своє застосування в різних областях, де їхні переваги перевищують недоліки. Вони часто використовуються в домашніх умовах, оскільки дозволяють легко об'єднувати комп'ютери, смартфони та інші пристрої в одну мережу, без необхідності в центральному контролері. Це дуже зручно для обміну файлами, доступу до спільних ресурсів і організації домашніх медіа-центрів.

У малих офісах однорангові мережі забезпечують простий і недорогий спосіб обміну файлами і доступу до спільних ресурсів, що робить їх ідеальним рішенням для невеликих компаній з обмеженим бюджетом на IT-інфраструктуру.

Одним з найвідоміших прикладів однорангової мережі є мережа BitTorrent. Вона дозволяє користувачам завантажувати і роздавати файли, де кожен учасник є як клієнтом, так і сервером. Це значно підвищує швидкість завантаження, оскільки файли діляться на дрібні частини і завантажуються одночасно з багатьох джерел.

Іншим прикладом є однорангові мережі для обміну повідомленнями, такі як Tox і Briar. Ці мережі забезпечують захищений обмін повідомленнями без центрального сервера, підвищуючи конфіденційність і безпеку.

Однорангові мережі також використовуються в децентралізованих системах обробки даних, де кожен вузол може виконувати обчислення і ділитися результатами з іншими вузлами. Це дозволяє створювати розподілені обчислювальні системи, які можуть ефективно використовувати ресурси кожного учасника мережі.

В соціальних мережах однорангова архітектура також знаходить своє місце. Деякі соціальні мережі використовують її для забезпечення децентралізованого обміну повідомленнями і контентом, що зменшує залежність від центральних серверів і підвищує конфіденційність користувачів.

Дана мережева архітектура використовує наступні технології:

- Distributed Hash Table (DHT) – це технологія, що дозволяє вузлам в одноранговій мережі ефективно знаходити один одного і зберігати дані розподілено. DHT використовується в багатьох P2P протоколах, таких як

BitTorrent.

- Blockchain - ця технологія забезпечує децентралізований і захищений облік транзакцій у мережі, що може бути використано для забезпечення безпеки в однорангових мережах.
- Wi-Fi Direct - технологія, що дозволяє пристроям встановлювати прямі бездротові з'єднання без використання точок доступу. Це робить дану технологію ідеальною для створення однорангових мереж у мобільних і портативних пристроях.



Рис. 1.4 Однорангова архітектура

1.3.2 Ієрархічна мережева архітектура

Ієрархічна мережева архітектура є популярним підходом у створенні бездротових мереж, що базується на використанні структурованої системи керування та розподілу даних. У такій архітектурі мережа складається з різних

рівнів або, по іншому, шарів, кожен з яких виконує певні функції і має свої обов'язки. Вузли вищого рівня керують і координують роботу вузлів нижчого рівня, забезпечуючи організовану та ефективну роботу всієї системи.

Ієрархічні мережі мають кілька суттєвих переваг, у порівнянні з одношаровою архітектурою. По-перше, централізоване управління і контроль системи дозволяють вузлам вищого рівня ефективно керувати всіма ресурсами мережі, забезпечуючи стабільну роботу і швидке реагування на проблеми. По-друге, їхня структура дозволяє легко масштабувати мережу, додаючи нові рівні або вузли на нижчих рівнях без значних змін у всій системі, що є ідеальним варіантом для великих організацій та підприємств з великою кількістю користувачів і пристроїв. Крім того, розподіл функцій і завдань між різними рівнями мережі забезпечує ефективне використання трафіка, уникаючи перевантаження окремих вузлів і підтримуючи високу продуктивність. І нарешті, централізоване управління дозволяє впроваджувати політики безпеки і контролювати доступ до ресурсів, що підвищує загальну безпеку мережі.

Однак, ієрархічні мережі також мають свої значущі недоліки. Одним із головних є залежність від центрального вузла, що робить його критичною точкою відмови: якщо він виходить з ладу, це може спричинити серйозні проблеми в усій мережі. Ще однією проблемою є складність розгортання і налаштування, адже дана архітектура вимагає ретельного планування і значних ресурсів, що може бути трудомістким і дорогим процесом. Обмежена гнучкість структурованої ієрархії може ускладнювати адаптацію до швидких змін або динамічного зростання мережі, що потребує додаткових зусиль для адаптації до нових умов. Нарешті, розгортання ієрархічних мереж може бути дорожчим порівняно з децентралізованими мережами через потребу у високоякісному обладнанні для центральних вузлів і складність налаштування.

Ієрархічні мережі використовуються в різних областях, де їхні переваги перебивають недоліки. Наприклад, великі компанії використовують ієрархічні мережі для ефективного управління і контролю над великою кількістю користувачів і пристроїв, що дозволяє централізовано управляти ресурсами і

забезпечувати безпеку мережі. Урядові організації застосовують ієрархічні мережі для надійного і безпечного зв'язку між різними підрозділами і відомствами, що є критично важливим для їхньої роботи.

В освітніх установах, таких як великі університети і школи, ієрархічні мережі забезпечують стабільний і швидкий доступ до навчальних ресурсів для студентів і викладачів. Це дозволяє ефективно організовувати навчальний процес і забезпечувати безперебійний доступ до інформації. Телекомунікаційні компанії, зокрема провайдери Інтернету, використовують ієрархічні мережі для надання надійних і високошвидкісних послуг своїм клієнтам, забезпечуючи ефективне управління великими обсягами даних.

Дана мережева архітектура використовує наступні технології:

- Контролери бездротових мереж (WLC) керують і координують роботу точок доступу, забезпечуючи централізоване управління і моніторинг.
- Протоколи, такі як RADIUS і TACACS+, забезпечують централізоване управління доступом і безпекою в цих мережах.
- Системи управління мережею (NMS) забезпечують централізоване моніторинг і управління всіма компонентами мережі, дозволяючи швидко виявляти і усувати проблеми.

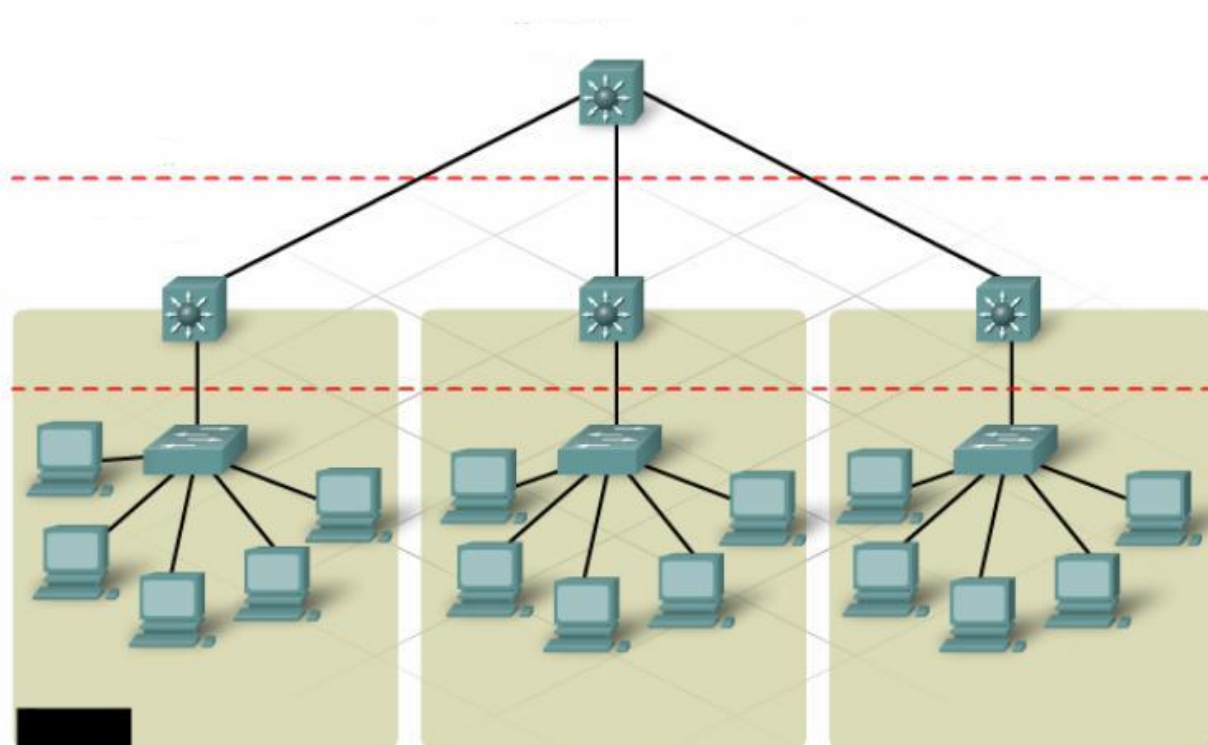


Рис. 1.5 Ієрархічна архітектура

1.3.3 Хмарна мережева архітектура

Хмарна мережева архітектура є сучасним підходом до організації та управління бездротовими мережами, що базується на використанні хмарних сервісів для керування та моніторингу мережевих ресурсів. У такій архітектурі ключові функції мережі, такі як управління, зберігання даних та обробка, виконуються у хмарі, що забезпечує високий рівень гнучкості, масштабованості та ефективності.

Дана архітектура має декілька переваг, що роблять її більш пріоритетним вибором між одношаровою і багаторівневою. По-перше, вона забезпечує гнучке управління і налаштування через GUI-інтерфейс, дозволяючи керувати мережевими пристроями з будь-якого місця через інтернет, що спрощує процес налаштування та управління мережами. По-друге, використання хмарних сервісів знижує потребу в дорогому фізичному обладнанні та його обслуговуванні, оскільки компанії можуть платити лише за ті ресурси, які вони використовують, що знижує загальні витрати на інфраструктуру.

Ще однією перевагою є швидке розгортання: хмарні мережі можуть бути розгорнуті набагато швидше, оскільки немає потреби у фізичному встановленні та налаштуванні обладнання. Висока доступність і надійність також є важливою перевагою, оскільки більшість хмарних сервісів використовують розподілену інфраструктуру з резервними копіями даних і автоматичним відновленням у випадку критичних збоїв. Крім того, хмарні провайдери зазвичай пропонують високий рівень безпеки даних, включаючи шифрування, регулярне оновлення програмного забезпечення та захист від кібератак.

Однак, хмарна архітектура має і свої недоліки. Вона залежить від інтернет-з'єднання: для доступу до хмарних сервісів потрібне стабільне і швидке інтернет-підключення, тому у випадку проблем з інтернетом доступ до хмарних ресурсів може бути обмеженим або взагалі відсутнім. Питання безпеки даних також викликають занепокоєння, адже передача і зберігання конфіденційних даних у хмарі можуть викликати сумніви щодо приватності і контролю за даними, адже за це відповідає провайдер. Нарешті, хоча хмарні сервіси можуть знижувати початкові витрати на інфраструктуру, їх використання може стати дорогим при тривалому використанні великих обсягів ресурсів, адже у більшості випадків доступ до них надається у вигляді підписки.

Хмарна мережева архітектура знаходить своє застосування у різних сферах. Великі компанії використовують хмарні сервіси для централізованого управління і моніторингу своїх мереж по всьому світу, що забезпечує швидке і гнучке розгортання нових філій або офісів. Університети і школи використовують хмарні платформи для надання доступу до навчальних ресурсів, забезпечення дистанційного навчання і управління великою кількістю підключених пристроїв.

Хмарні мережі також використовуються в Інтернет речах для управління і обробки даних з великої кількості IoT пристроїв, забезпечуючи масштабованість і високу продуктивність. Інтернет провайдери використовують хмарні платформи для надання своїм клієнтам швидкого і надійного доступу до інтернету і управління великими мережами.

Архітектура використовує наступні технології:

- Віртуалізація, яка дозволяє створювати віртуальні машини і мережі, що працюють на фізичному обладнанні хмарних провайдерів.
- Технології контейнеризації, такі як Docker і Kubernetes, дозволяють ефективно управляти додатками і службами у хмарі, забезпечуючи їх ізоляцію і високу продуктивність.
- Інструменти оркестрації, такі як Ansible, Puppet і Chef, дозволяють автоматизувати розгортання і управління мережевими ресурсами у хмарі.

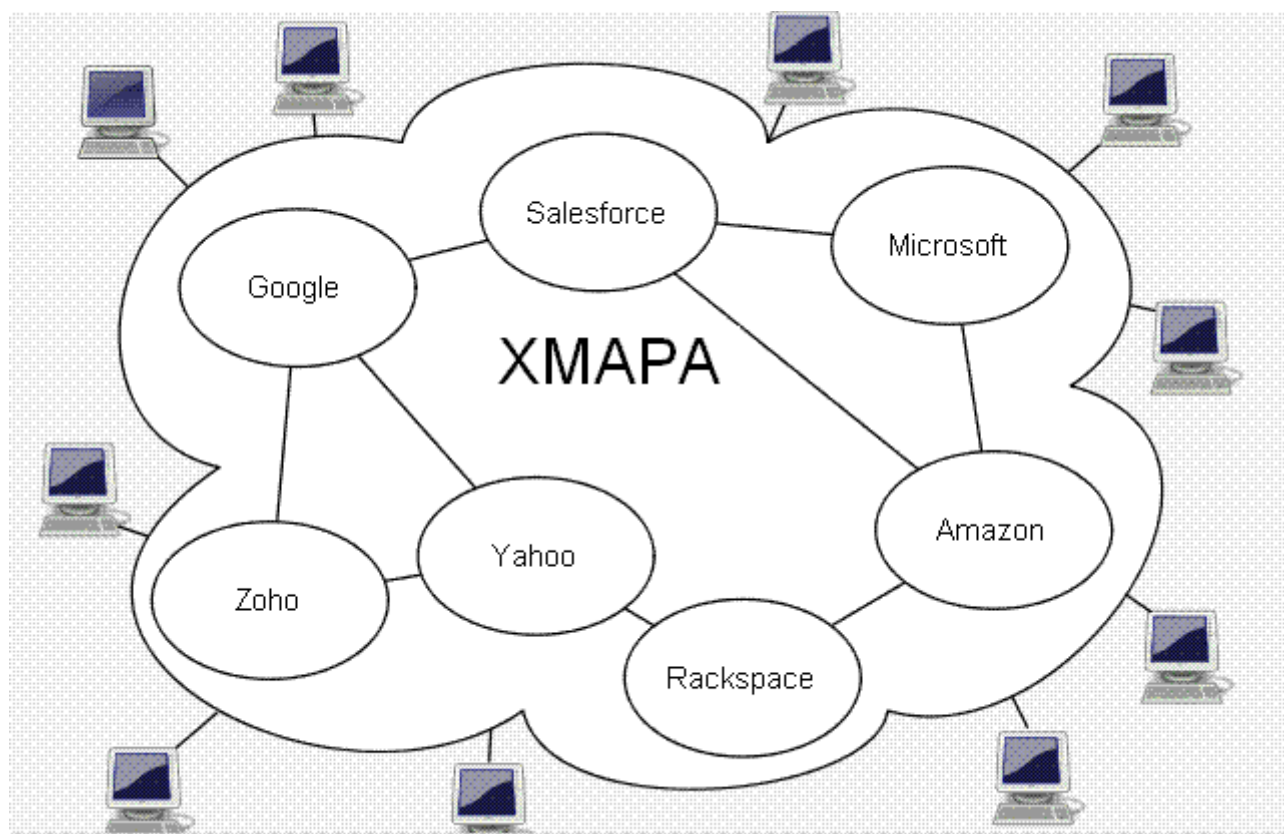


Рис. 1.6 Хмарна мережева архітектура

1.4 Протоколи бездротових мереж

1.4.1 Wi-Fi

Протокол IEEE 802.11, відомий як Wi-Fi, є одним із найпоширеніших стандартів для бездротових локальних мереж. Цей протокол забезпечує високошвидкісний доступ до інтернету та передачу даних без використання кабелів. Стандарт був розроблений Інститутом інженерів з електротехніки та

електроніки (IEEE) і став основою для широкого спектра бездротових продуктів і послуг.

Ключові технології Wi-Fi включають кілька інновацій, що підвищують швидкість, надійність та ефективність бездротових мереж:

- MIMO (Multiple Input Multiple Output) – це технологія, яка використовує кілька антен для одночасної передачі та прийому декількох потоків даних, що дозволяє підвищити швидкість і надійність зв'язку. Вперше вона була впроваджена в стандарті 802.11n і значно вдосконалена в 802.11ac та 802.11ax.
- MU-MIMO (Multi-User MIMO) – розширення технології MIMO, яке дозволяє одночасно обслуговувати кілька користувачів, підвищуючи ефективність використання спектра і продуктивність мережі в цілому. Введена в стандарті 802.11ac, ця технологія була покращена в 802.11ax.
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – технологія, яка дозволяє розділяти канали на підканали для одночасної передачі даних кількома пристроями, підвищуючи ефективність і знижуючи затримки в мережі. Вона була введена в стандарті 802.11ax.
- Beamforming – це технологія, яка дозволяє фокусувати сигнал в напрямку конкретного пристрою, що підвищує якість зв'язку і зменшує перешкоди. Введена в стандарті 802.11n.

Wi-Fi має кілька суттєвих переваг, що роблять його популярним вибором для бездротових мереж. Останні версії стандарту забезпечують високу швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с. Це дозволяє швидко і зручно підключатися до інтернету без використання кабелів, підтримуючи широкий спектр пристроїв. технологія також відзначається гнучкістю та зручністю, забезпечуючи можливість створення мереж різних розмірів – від домашніх до корпоративних. Використання частотних діапазонів 2.4 ГГц та 5 ГГц допомагає покращити продуктивність і уникнути перешкод.

Однак, Wi-Fi має і свої недоліки. Він чутливий до перешкод, тобто сигнал може бути перебитий іншими пристроями, що працюють у тих самих частотних

діапазонах. Крім того, швидкість і якість зв'язку знижуються зі збільшенням відстані між пристроями. Безпека, також, не найсильніша сторона даного протоколу, адже незахищені Wi-Fi мережі можуть бути вразливими до атак, тому важливо впроваджувати заходи безпеки, такі як шифрування WPA3, але і це не гарантує повного захисту від кібератак.

Можна сказати, що, на сьогоднішній день, Wi-Fi став невід'ємною частиною сучасного життя, забезпечуючи зручний і швидкий доступ до інтернету та локальних мереж. Завдяки постійному вдосконаленню стандарту IEEE 802.11, він продовжує залишатися провідною технологією для бездротових локальних мереж, задовольняючи зростаючі потреби користувачів у швидкості, надійності та безпеці.

1.4.2 LTE та 5G

LTE (Long Term Evolution) та 5G (п'яте покоління мобільних мереж) є провідними стандартами мобільного зв'язку, що забезпечують високошвидкісний доступ до інтернету та передачу даних на великі відстані. Вони використовуються для надання мобільних послуг мільйонам користувачів по всьому світу, забезпечуючи широкий спектр можливостей для комунікації та інтернет речей.

Спочатку про LTE. Основні характеристики даного протоколу включають кілька важливих аспектів, що забезпечують високу продуктивність і надійність цієї технології. Швидкість передачі даних досягає до 300 Мбіт/с для завантаження і до 75 Мбіт/с для вивантаження в базовій версії. У версії LTE-Advanced швидкості можуть досягати 1 Гбіт/с. LTE працює в різних частотних діапазонах, залежно від регіону, включаючи 700 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц та інші. Технології, які використовуються в LTE, включають для ефективного розподілу частотного спектра та MIMO для підвищення пропускної здатності та надійності зв'язку. Середня затримка в мережах LTE становить близько 30 мс, що значно менше, ніж у мережах 3G, забезпечуючи швидкий відгук і кращий користувацький досвід.

Переваги протоколу включають високу швидкість передачі даних, що дозволяє користувачам стрімити відео, завантажувати файли та користуватися іншими інтернет-сервісами з високою продуктивністю. LTE мережі забезпечують

широке покриття, охоплюючи великі території, включаючи як міські, так і сільські райони. Низька затримка в мережах підвищує якість зв'язку для інтерактивних застосувань, таких як відеодзвінки та онлайн-ігри.

Однак, LTE також має свої недоліки. Впровадження LTE вимагає значних інвестицій в інфраструктуру, включаючи оновлення базових станцій та мережевих компонентів. Крім того, в умовах високої щільності користувачів можливі проблеми з інтерференцією та перевантаженням мережі, що може вплинути на якість зв'язку.

5G є наступником LTE і представляє п'яте покоління мобільного зв'язку. Впроваджуючи нові технології та використовуючи нові частотні діапазони, даний протокол забезпечує ще вищі швидкості передачі даних, зменшені затримки та можливість одночасного підключення великої кількості пристроїв. Теоретично швидкість передачі даних може досягати до 20 Гбіт/с для завантаження та до 10 Гбіт/с для вивантаження даних. Також в ньому використовуються широкі спектри частот, включаючи суб-6 ГГц та міліметрові хвилі на частотах від 24 ГГц до 100 ГГц. Серед нових технологій, які використовує цей протокол, є Massive MIMO, Beamforming, Network Slicing та OFDMA. [30] Середня затримка в мережах 5G становить менше 1 мс, що робить її придатною для критично важливих застосувань, таких як автономні транспортні засоби та дистанційна хірургія.

П'яте покоління мобільних мереж має кілька суттєвих переваг. Надвисока швидкість передачі даних дозволяє використовувати нові додатки та послуги, такі як віртуальна реальність та доповнена реальність. Велика пропускна здатність 5G підтримує одночасне підключення великої кількості пристроїв, що є важливим для IoT та смарт-міст.

Однак, впровадження 5G має і недоліки. Воно потребує значних інвестицій в нову інфраструктуру, включаючи нові базові станції та мережеві компоненти. Крім того, поширення міліметрових хвиль обмежене через їхню високу схильність до затухання та перешкод, що вимагає більшої кількості базових станцій для забезпечення надійного покриття.

1.4.3 ZigBee

Zigbee – це протокол бездротової мережі, розроблений для додатків з низьким енергоспоживанням і низькою швидкістю передачі даних. [29] Він особливо підходить для застосувань в IoT, автоматизації будинків та промислових мереж.

Основні характеристики Zigbee включають роботу в кількох частотних діапазонах, зокрема 2.4 ГГц (глобально), 900 МГц (Північна Америка) та 868 МГц (Європа). Швидкість передачі даних досягає до 250 Кбіт/с у діапазоні 2.4 ГГц. Радіус дії зазвичай становить до 100 метрів у приміщеннях та до 1 км на відкритому просторі. Zigbee підтримує різні топології мережі, включаючи зіркову, деревоподібну і сіткову (mesh), що дозволяє створювати складні і надійні мережі.

Щодо основних технологій та особливостей цього протоколу, то ними являються низьке енергоспоживання, завдяки якому пристрої можуть працювати на батарейках протягом кількох років. Сітчаста топологія дозволяє кожному пристрою у мережі передавати дані далі, підвищуючи надійність і стійкість мережі. Zigbee мережі легко розгортати і налаштовувати, що робить їх ідеальними для домашніх та промислових застосувань. Крім того, цей протокол підтримує шифрування AES-128 для забезпечення безпеки передачі даних.

Zigbee має кілька суттєвих переваг. Основною перевагою, на мою думку, є енергоефективність, адже дуже низьке енергоспоживання дозволяє пристроям працювати на батарейках протягом тривалого часу. Гнучкість топології дозволяє створювати надійні та масштабовані мережі завдяки підтримці різних топологій.

Однак, протокол має і свої недоліки. Низька швидкість передачі даних, яка досягає максимум 250 Кбіт/с, може бути недостатньою для деяких додатків, що потребують високої пропускної здатності. Радіус дії Zigbee обмежений у порівнянні з іншими технологіями, такими як Wi-Fi. Крім того, робота в діапазоні 2.4 ГГц може призводити до перешкод з іншими пристроями, що працюють на цій же частоті, такими як Wi-Fi та Bluetooth.

Zigbee знаходить широке застосування в різних сферах. У домашній автоматизації він використовується для управління освітленням, клімат-контролем, системами безпеки, розумними розетками та іншими пристроями. У

промислових мережах Zigbee застосовується для моніторингу та управління виробничими процесами, відстеження активів та контролю стану обладнання. У сфері інтернет речей він використовується для підключення та взаємодії різноманітних пристроїв і сенсорів, створюючи розумні середовища. В охороні здоров'я Zigbee застосовується для медичних датчиків та систем моніторингу здоров'я пацієнтів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРОБЛЕМ В ЇХ АРХІТЕКТУРІ

2.1 Фактори, що обмежують масштабованість одношарових сітчастих мереж

2.1.1 Модель мережі

Для початку, розглянемо бездротову сітчасту мережу, що складається з n вузлів, як показано на Рис. 2.1. Мережа поділена на n шестикутних комірок, де кожна шестикутна комірка містить рівно один вузол. Кожен вузол може бути розміщений або точно в центрі шестикутної комірки (тобто регулярна сіткова мережа), або випадково розподілений навколо центру в межах невеликого діапазону збурень (тобто випадково збурена мережа). Відмінно від випадкової мережі в [1], де розмір комірки має бути принаймні $\log(n)$, щоб кожна комірка з високою ймовірністю містила принаймні один вузол, географічні розташування, розглянуті в цій роботі, більше схожі на регулярну ґратку. Відповідно, фактор $1/\log(n)$, що з'являється в досяжній продуктивності на вузол у [1], можна усунути, таким чином, усуваючи вплив розташування вузлів на масштабованість. Визначимо l -те зовнішнє "кільце" комірки як набір комірок, що знаходяться на l стрибків від даної комірки. Для центральної комірки є $6l$ комірок у l -му зовнішньому кільці. Припустимо, що всього навколо центральної комірки є L_r зовнішніх кілець. Загальна кількість вузлів дорівнює $n = 3 L_r(L_r + 1) + 1$. Відстань між центрами двох сусідніх комірок дорівнює $3a$, де a позначає довжину сторони шестикутної комірки, а радіус сіткової мережі можна виразити як $3L_r a$. Для розширеної одношарової сіткової мережі, коли n збільшується, розмір комірки залишається незмінним, тобто a є фіксованою константою, тоді як розмір мережі лінійно зростає з n . Таким чином, можна вивести, що $L_r = \Theta(n)^{1/2}$.

Щодо передачі даних, кожен вузол випадково та незалежно вибирає інший вузол як пункт призначення, формуючи пару джерело-призначення (S-D). Кількість

пар S-D N_{S-D} дорівнює n , тобто $N_{S-D} = n$. Всього в мережі є N_{S-D} потоків даних.

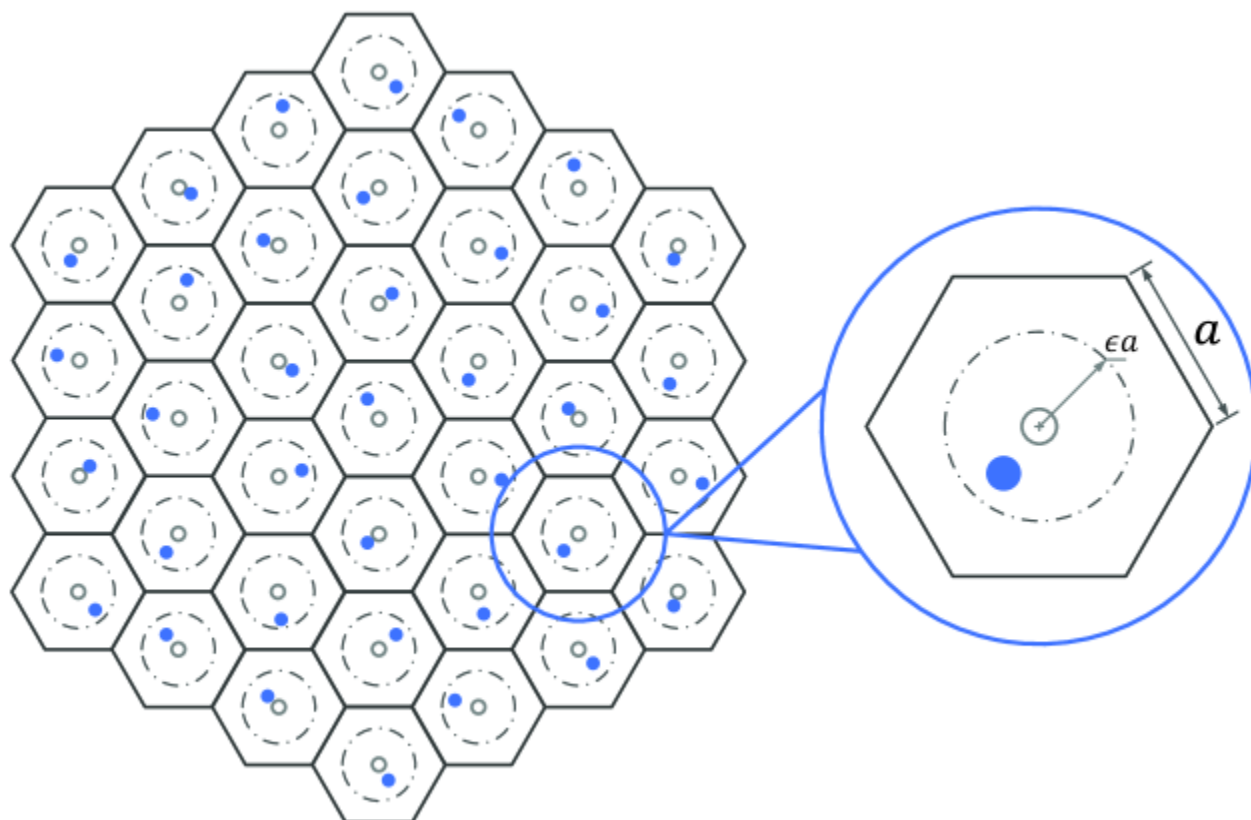


Рис. 2.1 Гексагональна одношарова сітчаста мережа

2.1.2 Модель передачі

Нехай d_{ij} позначає відстань між вузлами i та j , і припустимо рівну потужність передачі P для всіх вузлів. Потужність отриманого сигналу P_{ij} на вузлі j від вузла i можна виразити як

$$P_{ij} = CPd_{ij}^{-a} \quad (1)$$

де a є показником втрат на шляху з типовими значеннями в зовнішніх середовищах від 2 до 4, а C є ефективним коефіцієнтом підсилення антени. Для отримання допустимої швидкості передачі потужність отриманого сигналу повинна бути не меншою за певний поріг, позначений як P_0 , тобто $P_{ij} = CPd_{ij}^{-a} \geq P_0$ або, еквівалентно,

$$d_{ij} \leq (CP/P_0)^{1/\alpha}, \quad (2)$$

що надає поріг на максимальну допустиму відстань для двох вузлів для зв'язку.

У сіткових мережах передача даних здійснюється за допомогою множинних стрибків. Ми припускаємо, що всі вузли мають однаковий радіус передачі r_0 . Зі збільшенням радіусу передачі кількість необхідних стрибків зменшується. Нехай $d_{l,m \max}$ та $d_{l,m \min}$ будуть максимальними та мінімальними відстанями від вузла до іншого вузла, розташованого в l -му зовнішньому кільці навколо себе, точні значення яких можна знайти в [13]. Вузол може спілкуватися з іншим вузлом всередині r -го зовнішнього кільця навколо себе, якщо

$$d_{r,m \max} \leq r_0 < d_{r+1,m \min}, \quad r=1, \dots, L_r$$

Ця умова для радіусу передачі може бути еквівалентно перетворена на вимоги до потужності передачі. Тут ми розглядаємо лише мінімально необхідну потужність для забезпечення допустимої швидкості зв'язку, тобто $CP d_{ij}^{-\alpha} = P_0$. Оскільки радіус мережі а залишається постійним у розширеній мережі, $d_{r,m \max}$ зростає в тому ж порядку з r . Таким чином, необхідну потужність передачі можна вивести як

$$P = P_0 d_{r,m \max}^\alpha / C = \Theta(r^\alpha). \quad (3)$$

Позначимо R_{ij} як швидкість передачі від вузла i до вузла j . R_{ij} можна отримати за формулою Шеннона, тобто

$$R_{ij} = W \log_2(1 + \gamma_{ij}), \quad (4)$$

де W є виділеною шириною каналу, а γ_{ij} представляє відношення сигнал/інтерференція плюс шум (SINR) отриманого сигналу на вузлі j від вузла i .

2.1.3 Аналіз пропускної здатності одношарових сіткових мереж

У даній роботі я приймаю те ж саме визначення пропускної здатності на вузол, що й у [1]. Досяжна пропускна здатність на вузол одношарової сіткової мережі, позначена як $R(n)$, вказує на те, що кожен вузол може передавати дані до обраного пункту призначення зі швидкістю $R(n)$. Щоб розглянути фактори, які обмежують масштабованість сіткових мереж, необхідне дослідження масштабування пропускної здатності на вузол для одношарових сіткових мереж, тобто як $R(n)$ змінюється з n , є суттєвим. Зокрема, два випадки, що характеризуються двома різними радіусами передачі r , аналізуються у цій частині для вивчення пропускної здатності на вузол одношарових сіткових мереж, а саме $r = \Theta(1)$ та $r = \Theta(n)$. У першому випадку вузли можуть отримувати доступ лише до інших вузлів у своїх сусідніх комірках, і необхідна багатоходова передача для передачі даних на великі відстані. З іншого боку, у другому випадку передача даних може бути завершена протягом кількох стрибків, оскільки радіус передачі знаходиться в тому ж порядку, що й радіус мережі. Таким чином, ми називаємо ці дві специфічні схеми передачі як схему коротких стрибків (SH) та схему довгих стрибків (LH). Відповідно до (3), необхідна потужність передачі під цими двома схемами масштабується як

$$P = \{\Theta(1), \text{ для SH схеми}, \Theta(n^{a/2}), \text{ для LH схеми}\} \quad (5)$$

Пропускна здатність на вузол для SH та LH схем передачі зазначена в наступній теоремі.

Теорема 1. (Одношарова мережа): Для, як регулярних, так і випадково збурених шестикутних сіткових мереж з n вузлами досяжна пропускна здатність на вузол є

$$R(n) = \{\Theta(W/n), r = \Theta(1), \Theta(W/n), r = \Theta(n)\},$$

де W - це смуга пропускання, виділена для бездротової передачі, $r = \Theta(1)$ та $r = \Theta(n)$ відповідають SH та LH схемам передачі відповідно.

Загалом, процедура отримання пропускної здатності на вузол одношарових сіткових мереж може бути розбита на наступні кроки. Спочатку виводиться нижня межа на швидкість передачі між двома комунікаційними вузлами мережі, позначена як R^L . Далі отримується максимальна кількість інтерферуючих сусідніх комірок, позначена як Δc . Використовуючи часовий поділ для розділення цих інтерферуючих передач, кожен вузол активний у кожному $(1 + \Delta c)$ часовому інтервалі [1]. Верхня межа на кількість потоків даних, які вузол повинен передати, потім виводиться як Z^U . Нарешті, припускаючи, що ці не більше ніж Z^U потоки даних також розділені за допомогою часового поділу, досяжна пропускна здатність на вузол може бути отримана як

$$R(n) = R^L / (1 + \Delta c) Z^U. \quad (6)$$

2.1.4 Нижня межа швидкості передачі

Щоб вивести нижню межу швидкості передачі, нам потрібно визначити мінімальну отриману потужність та максимальну інтерференцію. Що стосується передачі даних від вузла i до вузла j , то кумулятивна інтерференція, що виникає на вузлі j , походить від усіх інших одночасних передач, що використовують ту ж частотну смугу. Максимальна інтерференція виникає, коли вузол i розташований у центрі комірки мережі, і всі інші вузли передають дані одночасно. Використовуючи метод часового поділу, SINR передачі даних є $\Omega(1)$ в одношаровій сітковій мережі, як показано в [14] та [13]. Таким чином, швидкість передачі між вузлом i та вузлом j є $R_{ij} = W \log_2(1 + \gamma_{ij}) = \Omega(W)$. Нижня межа швидкості передачі між двома комунікаційними вузлами для одношарової сіткової мережі може бути отримана як

$$R^L = \Theta(W). \quad (7)$$

2.1.5 Кількість інтерферуючих комірок

Згадаємо модель мережі, показану на Рис. 1. Оскільки кожен вузол може спілкуватися з іншим вузлом всередині r -го зовнішнього кільця навколо себе, у

найгіршому випадку всі інші вузли всередині r -го зовнішнього кільця навколо приймаючого вузла, крім передаючого вузла, вважаються інтерферуючими вузлами. Кількість інтерферуючих комірок для приймаючого вузла масштабується в порядку r^2 , і отже

$$\Delta c = \Theta(r^2) = \{\Theta(1), r = \Theta(1); \Theta(n), r = \Theta(n)\}. \quad (8)$$

2.1.6 Кількість потоків даних, які передає кожен вузол

Кількість стрибків, необхідних для передачі даних, залежить від радіусу передачі r_0 . Більший радіус передачі призводить до меншої кількості стрибків, необхідних для передачі даних. Нехай Z_i позначає кількість потоків даних, в яких бере участь вузол i . У [13] було виведено, що

$$\mathbb{E}[Z_i] = \{\Theta(n), r = \Theta(1); \Theta(1), r = \Theta(n)\}.$$

Інтуїтивно, коли кожен вузол може отримувати доступ лише до іншого вузла в сусідній комірці, очікувана кількість стрибків, необхідних для кожного потоку даних, масштабується в тому ж порядку, що і кількість зовнішніх кілець центральної комірки, тобто $\Theta(\sqrt{n})$. Таким чином, загальна кількість стрибків через мережу є $\Theta(n\sqrt{n})$, і отже кожен вузол має передати $\Theta(\sqrt{n})$ потоків даних у середньому.

Для схеми передачі SH, де $r = \Theta(1)$, верхню межу Z_i можна отримати, застосувавши нерівність Чернова для верхньої межі [15] до $\mathbb{E}[Z_i]$. Результати показують, що $Z_i \leq (1 + \delta) \mathbb{E}[Z_i]$ для кожного вузла i з ймовірністю не меншою ніж $1 - 1/n^2$, де $\delta = 6 \log n / \mathbb{E}[Z_i]$. Таким чином, верхня межа Z^U під час передачі за схемою SH може бути отримана як

$$Z_i^{(U,SH)} = (1 + \delta) \mathbb{E}[Z_i] = \Theta(n). \quad (9)$$

Для схеми LH, де $r = \Theta(n)$, оскільки більшість передач даних завершуються протягом кількох стрибків, верхня межа кількості потоків даних, які кожен вузол має передати, обмежується константою, тобто

$$Z_i^{(U,LH)} = \Theta(1). \quad (10)$$

Комбінуючи (9) та (10), отримуємо

$$Z_i^{(U)} = \{\Theta(n), r = \Theta(1); \Theta(1), r = \Theta(n)\}. \quad (11)$$

2.1.7 Закон масштабування пропускної здатності

Підставляючи (7), (8) і (11) у (6), досяжна пропускна здатність на вузол для одношарової шестикутної сіткової мережі може бути отримана як

$$\begin{aligned} R(n) &\geq R^L / (1 + \Delta c) Z^U \\ &= \{\Theta(W/n), r = \Theta(1); \Theta(W/n), r = \Theta(n)\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Це завершує доказ Теорема 1.

2.1.8 Ключові фактори, що обмежують масштабованість

Як показано в (12), пропускна здатність на вузол зменшується в порядку $1/n$ та $1/n$ для схем SH та LH відповідно. Аналізуючи процедуру виведення, можна визначити два фактори, які обмежують масштабованість:

- Спільне використання каналу:

З (12), пропускна здатність на вузол сіткових мереж має нижню межу $1/n$ у схемі SH, де $r = \Theta(1)$. У цьому сценарії кожен вузол може отримувати доступ лише до кількох сусідніх вузлів, і більшість потоків даних передаються крок за кроком. Таким чином, багатьом вузлам потрібно допомагати передавати дані інших пар S-D. Оскільки кожен потік даних має бути завершений протягом $\Theta(n)$ кроків, загальна кількість необхідних унікальних кроків є

$\Theta(n)$. Однак одношарова сіткова мережа може підтримувати лише $\Theta(n)$ кроків, що призводить до проблеми спільного використання каналу, тобто кожному вузлу потрібно допомагати передавати $\Theta(n)$ потоків даних інших пар S-D. З іншого боку, у схемі LH, де $r = \Theta(n)$, передача даних може бути завершена за кілька кроків, і кожному вузлу потрібно передавати лише $\Theta(1)$ потоків даних. Таким чином, проблема спільного використання каналу більше не є ключовим фактором, що обмежує пропускну здатність на вузол.

- Інтерференція:

Оскільки часовий поділ використовується для зменшення надмірної інтерференції, кількість інтерферуючих комірок безпосередньо впливає на пропускну здатність на вузол. Зокрема, у схемі SH, де $r = \Theta(n)$, передачі відбуваються між сусідніми комірками. Кількість інтерферуючих комірок є $\Theta(1)$, що мало впливає на пропускну здатність схеми SH. Навпаки, у схемі LH, де $r = \Theta(n)$, існує $\Delta c(LH) = \Theta(n)$ інтерферуючих комірок, які необхідно зберегти без інтерференції для успішної довгочасової передачі, що призводить до фактору $1/n$ у законі масштабування пропускну здатності в схемі LH.

Можна побачити, що існує компроміс між спільним використанням каналу та інтерференцією, який залежить від радіусу передачі. Оскільки радіус передачі збільшується, кількість потоків даних, які кожен вузол має передавати, може зменшуватися, тобто проблема спільного використання каналу полегшується, але це відбувається за рахунок більшої кількості інтерферуючих комірок.

2.2 Дизайн архітектури для mesh-мереж

Судячи з попереднього розділу, спільне використання каналу є основним фактором, який обмежує масштабованість бездротових сіткових мереж, що використовують схему передачі з короткими стрибками, що відповідає розширеній мережі. У результаті, зменшення кількості потоків даних, які кожен вузол має передавати, є ключовим підходом до покращення пропускну здатності на вузол. Хоча збільшення потужності передачі для розширення радіусу передачі може

зменшити кількість стрибків, необхідних для передачі кожної пари S-D, необхідна потужність для кожного вузла зростає експоненціально відповідно до (5). Крім того, для пом'якшення надмірної інтерференції, що виникає внаслідок збільшення радіусу передачі, потрібна складна схема скасування інтерференції, наприклад, ієрархічна архітектура [8]. Обидва з вищезазначених факторів роблять непрактичним просто збільшувати потужність передачі в реальних умовах. Таким чином, необхідна нова ефективна архітектура для бездротових сіткових мереж, щоб вирішити обидві проблеми - як спільного використання каналу, так і інтерференції.

2.2.1 Розуміння архітектурного дизайну

У попередньому аналізі пропускної здатності на вузол в одношарових сіткових мережах було встановлено, що спільне використання каналу є основною причиною зниження пропускної здатності на вузол у розширених мережах, де використовується багатоходова схема передачі. Щоб досягти масштабованості в розширених сітчастих мережах, важливо усунути проблему спільного використання каналу. Як показано раніше, проблема спільного використання каналу виникає, коли вузлу потрібно передавати дані інших пар S-D. Коли використовується схема передачі SH, кількість потоків даних, які кожен вузол має передати, становить порядок n . З іншого боку, коли використовується схема передачі LH, вузлу потрібно передавати лише $\Theta(1)$ потоків даних, але кількість інтерферуючих комірок стає $\Theta(n)$, що також обмежує пропускну здатність на вузол. Більше того, було доведено в [11] і [10], що багатоходова схема передачі є впорядковано оптимальною в розширених мережах. Таким чином, необхідна нова архітектура, щоб вирішити обидві проблеми - спільного використання каналу та інтерференції - для досягнення масштабованості в розширених мережах.

Щоб вирішити проблему спільного використання каналу в розширеній сітчастій мережі, ключовим є обмеження кількості потоків даних, які кожен вузол має передати. Для досягнення цієї мети можна використовувати додаткові вузли ретрансляції, щоб встановити більше бездротових каналів і полегшити передачу даних. Таким чином, створюється двошарова сіткова мережа, де перший шар

містить усі вузли даних, а другий шар складається з вузлів ретрансляції. Щоб полегшити проблему спільного використання каналу в шарі даних, можна використовувати таку політику маршрутизації. Зокрема, для певної пари S-D, якщо кількість стрибків у рамках багатоходової схеми в першому шарі перевищує певний заданий поріг, то дані будуть передаватися до шару ретрансляції у багатоходовий спосіб. Після досягнення вузла ретрансляції поруч із пунктом призначення дані будуть передаватися до вузла призначення, використовуючи декілька стрибків. Проблема спільного використання каналу в шарі даних може бути вирішена, оскільки кожному вузлу потрібно передавати лише $\Theta(1)$ потоків даних незалежно від кількості вузлів. Для досягнення цієї мети щільність вузлів ретрансляції повинна залишатися константною незалежно від n , так щоб кожен вузол мав доступ до вузла ретрансляції в межах певної кількості стрибків. Кількість необхідних вузлів ретрансляції зростає в порядку $\Theta(\sqrt{n})$. Вузол ретрансляції може розглядатися як окрема сіткова мережа. Проблема спільного використання каналу у шарі ретрансляції тепер стає вузьким місцем пропускної здатності, якщо радіус передачі вузлів ретрансляції є фіксованим незалежно від n . Один зі способів вирішення цієї проблеми полягає в підтримці кількості вузлів ретрансляції константною, збільшуючи їхній радіус передачі відповідно до n , що може бути досягнуто шляхом збільшення потужності передачі, виділення більшої ширини смуги пропускання і використання більшої кількості антен. Проте, із збільшенням n , необхідна потужність передачі стане недосяжною для цієї двошарової сіткової мережі.

Оскільки проблема спільного використання каналу також проявляється у шарі ретрансляції двошарових мереж, це обмежує масштабованість цього типу сіткових мереж. Таким чином, у даній роботі розглядається багатошарова ієрархічна архітектура для меш-мереж. Як показано на Рис. 2.2, кілька типів вузлів ретрансляції з різним радіусом передачі покриваються шаром даних. Вузли на вищих шарах мають більший радіус передачі та вищі швидкості передачі, ніж вузли на нижчих шарах, що досягається виділенням більше ресурсів для зв'язку, включаючи ширину смуги, кількість антен і потужність передачі.

2.3 Проектування архітектури

2.3.1 Розподіл вузлів

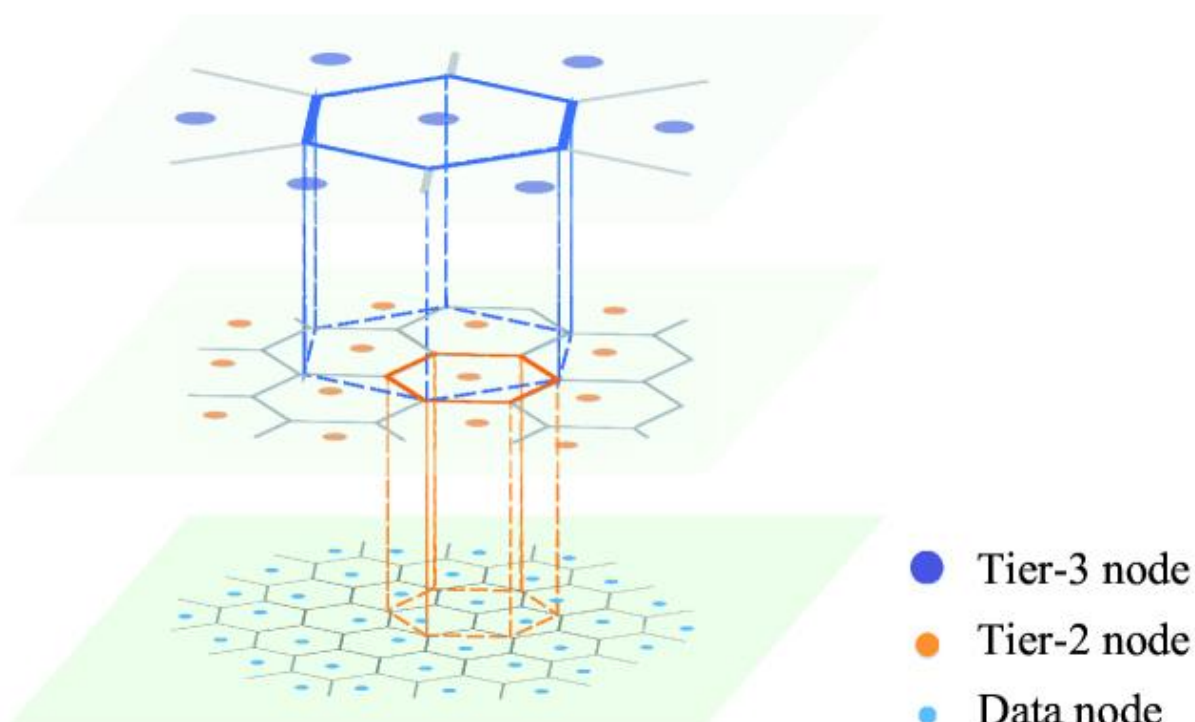


Рис. 2.2 Ілюстрація багатошарової ієрархічної архітектури

Розглянемо багатошарову бездротову мережу, проілюстровану на рисунку вище, де ієрархічна архітектура побудована з декількома шарами ретрансляції, що перекривають перший шар, який містить n вузлів даних. Ці вузли ретрансляції розгорнуті виключно для сприяння передачі даних і не генерують ніяких трафікових даних самі по собі.

Припустимо, що в мережі є L шарів вузлів, при цьому n_l позначає кількість вузлів у l -му шарі. З цього випливає, що $n_l = n$. На кожному шарі мережа поділяється на n_l шестикутних комірок, де кожна комірка містить рівно один l -й вузол, тобто ті ж самі умови, що і для згаданої одношарової шестикутної сіткової мережі. Кожен вузол розташований навколо центру комірки з допустимим невеликим випадковим збуренням. Зв'язок l -го шару відбувається у смузі пропускання W_l . Крім того, кожен вузол на l -му шарі обладнаний M_l антенами. Потужність передачі кожного елемента антени позначається як P_l .

Що стосується трафіку даних, то все ще передбачається, що кожен вузол даних у першому шарі випадково та незалежно вибирає інший вузол даних як пункт призначення, тобто пару S-D. Таким чином, все ще $\in N_{S-D} = n$ потоків даних.

2.3.2 Масштабування параметрів мережі

Таблиця 2.1

Відношення масштабування параметрів мережі

	Масштабування	Діапазон параметрів
Кількість вузлів	$n_l = n / l^k$	$k \in [2, \infty]$
Ширина смуги	$W_l = W_1 l^\psi$	$\psi \in [1, \infty]$
Кількість антен	$M_l = M_1 l^v$	$v \in [1, \infty]$

У цій роботі ми розглядаємо відношення масштабування для параметрів мережі з точки зору кількості вузлів n_l , виділеної смуги пропускання W_l і кількості антен M_l щодо індексу шару l , як показано в таблиці 2.1. Щоб забезпечити, що загальна кількість вузлів у мережі є кінцевою, n_l має принаймні зменшуватися у квадратному порядку від l . Я припускаю, що $n_l = n / l^k$, де $k \geq 2$. Відповідно, розмір комірки l -го шару, позначений як A_l , становить $s_l = n / n_l = l^k$. Тоді радіус комірки l -го шару, позначений як a_l , є

$$a_l = \Theta(\sqrt{A_l}) = \Theta(l^{k/2}). \quad (13)$$

Щоб уникнути проблеми спільного використання каналу на найвищому рівні, передача даних повинна бути завершена за кілька стрибків. Таким чином, повинно виконуватися $n_l = n / l^k = \Theta(1)$, і загальна кількість рівнів L може бути отримана як

$$L = \Theta(n^k), \quad (14)$$

що залежить як від n , так і від k .

Як пояснювалося раніше, виділена смуга пропускання і кількість антен також повинні збільшуватися із зростанням n , щоб підтримувати незмінну пропускну здатність. Тут я також припускаю, що смуга пропускання і кількість антен збільшуються за поліноміальним порядком щодо l , тобто $W_l = l^\psi$ і $M_l = l^\nu$, де ψ і ν є константами не меншими за 1. Таким чином, загальна необхідна смуга пропускання є

$$W_{tot} = \sum_{l=1}^L W_l = \Theta(W_1 L^{\psi+1}) = \Theta(n^{(\psi+1)/k}).$$

Максимальною кількістю необхідних антен є

$$M_{max} = W_l = \Theta(M_1 L^\nu) = \Theta(n^{\nu/k}).$$

Як видно, загальна необхідна смуга пропускання і максимальна кількість антен зростають до безкінечності із збільшенням n . Тому, щоб отримати розумне і досяжне налаштування параметрів мережі, значення трьох порядків масштабування, ψ , ν і k , повинні бути ретельно обрані в реалістичних умовах розгортання, що буде обговорено в розділі третьому розділі.

На відміну від інших параметрів, P_l повинна бути обрана для підтримання допустимої швидкості зв'язку між комунікаційними вузлами. На основі (3), щоб гарантувати допустиму швидкість зв'язку між двома сусідніми вузлами в l -му шарі, потужність отриманого сигналу повинна бути не меншою за певний поріг, позначений як P_l^0 , тобто $C_l P_l d_l^{-\alpha_l} \geq P_l^0$ або, еквівалентно,

$$P_l \geq P_l^0 d_l^{\alpha_l} / C_l, \quad (15)$$

де d_l представляє відстань між двома сусідніми вузлами в l -му шарі, α_l і C_l є показником втрат на шляху та константою, що визначається частотою, профілем антени тощо, відповідно до l -го шару. З (13) отримуємо, що $d_l = \Theta(n / n_l) = \Theta(l^{k/2})$, і тому

$$d_{l+1} / d_l = (1 + 1 / l)^{k/2}. \quad (16)$$

Підставляючи $d_l = \Theta(l^{k/2}) = \Theta(n)$ у (15), закон масштабування для необхідної потужності передачі найвищого шару ретрансляції є

$$P_L = \Omega(n^{\alpha/2}). \quad (17)$$

2.3.3 Політика максимальної маршрутизації з D-стрибками

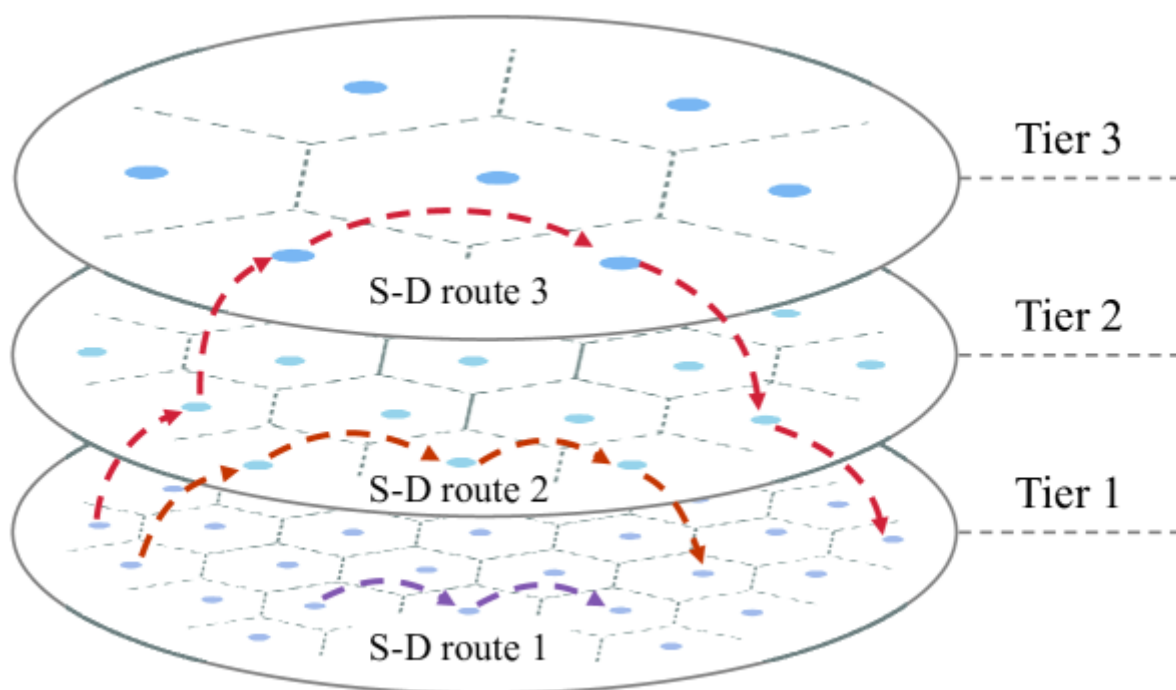


Рис. 2.3 Політика максимальної маршрутизації з D-стрибками.

Як уже зазначалося, вирішення проблеми спільного використання каналу вимагає зменшення кількості потоків даних, у яких кожен вузол допомагає при ретрансляції. Щоб скористатися транспортною ємністю, наданою новими доданими багаторівневими вузлами ретрансляції, використовується багаторівнева стратегія маршрутизації, яка приймає дані від джерела до призначення. Основний принцип цієї політики маршрутизації полягає в ефективній передачі даних для даної пари S-D у багаторівневій формі через багаторівневу сіткову мережу.

Розглядаючи кожен рівень як індивідуальну сіткову мережу, можливим є доступ кожного вузла до сусідніх вузлів у межах одного стрибка, дозволяючи зв'язок між вузлами за допомогою багатоходової передачі на кожному рівні. Щоб запобігти проблемі спільного використання каналу, спостережуваний у одношаровій сітковій мережі, важливо обмежити кількість стрибків для передачі даних на кожному рівні. Тому ми пропонуємо політику максимального маршрутизації з D-стрибками для багаторівневої сіткової мережі на основі політики максимального маршрутизації L, обговореної в [16, 17]. На кожному рівні вузол-джерело надсилає дані до відповідного вузла призначення, використовуючи багатоходову схему, якщо це можна досягти протягом D_l стрибків. В іншому випадку, вузол-джерело надсилає дані до найближчого наступного вузла вищого рівня за допомогою багатоходової схеми передачі. Подібне рішення приймається для кожного наступного рівня, доки дані не досягнуть конкретного рівня, де передача може бути завершена в межах певної кількості стрибків. Потім дані передаються на перший рівень аналогічним чином і, нарешті, прибувають до сіткової мережі призначення. Відповідний вузол призначення для нового "нового" вузла на кожному рівні ретрансляції обирається як вузол ретрансляції того ж рівня, найближчий до вузла призначення нижчого рівня. Рис. 2.3 ілюструє приклад того, як здійснити передачу даних для пари S-D за допомогою цієї багаторівневої політики маршрутизації.

Крім того, Рис. 2.4 показує три типи передачі та прийому даних для вузла в l -му рівні ($2 \leq l \leq L - 1$). Передача даних l -го рівня включає передачу на тому ж рівні, передачу вгору до $(l + 1)$ -го рівня і передачу вниз з $(l + 1)$ -го рівня. Ці передачі використовують ту ж смугу пропускання, що виділена для l -го рівня. Що стосується L -го рівня, то передача даних містить лише передачу на тому ж рівні.

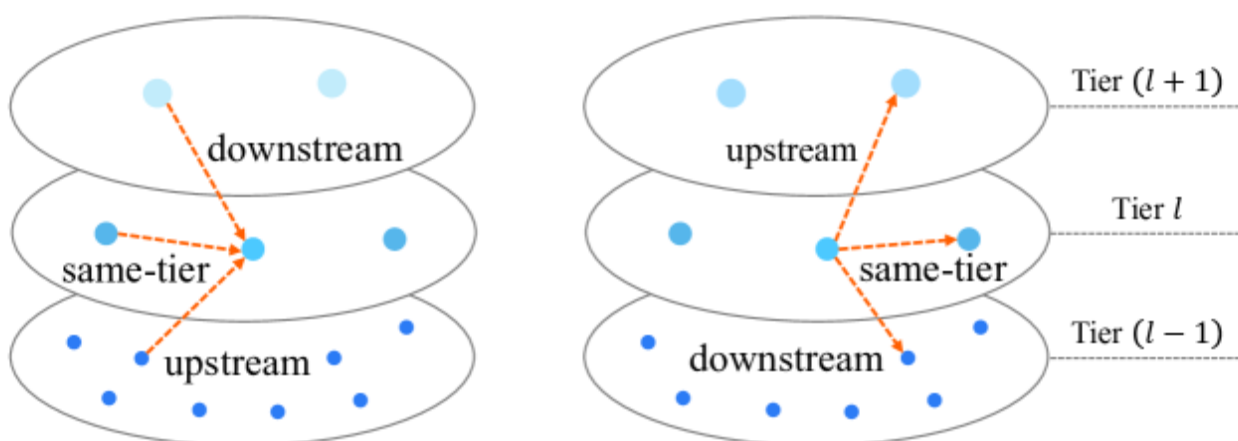


Рис. 2.4 Передача та прийом даних для вузла на рівні l

2.4 Досяжна пропускна здатність на вузол для багатошарової сіткової мережі

2.4.1 Пропускна здатність на вузол

Спочатку ми розширюємо визначення пропускної здатності на вузол для одношарової сіткової мережі на випадок багатошарової сіткової мережі. Подібно до одношарової сіткової мережі, пропускна здатність на вузол $R(n)$ біт/с для багатошарової сіткової мережі з n бездротових вузлів даних досягається, якщо кожен вузол може передавати дані до свого обраного пункту призначення зі швидкістю $R(n)$ біт/с. Більше того, кінцева пропускна здатність $R(n)$ біт/с для l -го рівня багатошарової сіткової мережі вважається досяжною, якщо будь-які два вузли в l -му рівні можуть зв'язуватися один з одним зі швидкістю $R_l(n)$ біт/с.

Процедура виведення досяжної пропускної здатності на вузол у багатошаровій сітковій мережі підсумовується наступним чином. Нехай R_l^L позначає нижню межу швидкості передачі посилок l -го рівня, включаючи передачу на тому ж рівні, передачу вгору до $(l+1)$ -го рівня та передачу вниз з $(l+1)$ -го рівня. Нехай Δc_l та Z_l^U позначають максимальну кількість інтерферуючих сусідніх вузлів для вузла на l -му рівні та максимальну кількість потоків даних, які кожен вузол на l -му рівні повинен передати відповідно. Оскільки використовується часовий поділ для зменшення надмірної інтерференції та розділення потоків даних

різних типів на одному вузлі, досяжна кінцева швидкість передачі між двома вузлами на l -му рівні, позначена як $R_l(n)$, може бути отримана як

$$R(n) \geq R_l^L / (1 + \Delta c_l) Z_l^U. \quad (18)$$

З політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком кожен потік даних завершується у багаторівневій формі, враховуючи досяжну пропускну здатність на вузол l -го рівня R_l^L у багат шаровій сітчастій мережі, досяжна кінцева швидкість передачі для кожного потоку даних S-D або пропускну здатність на вузол для багат шарової сіткової мережі $R(n)$, може бути отримана шляхом взяття мінімуму з усіх R_l^L від $l = 1$ до L , тобто

$$R(n) = \min_{\{1 \leq l \leq L\}} R_l(n). \quad (19)$$

2.4.2 Схема передачі даних

Тут схема передачі в основному зосереджена на фізичних технологіях та управлінні інтерференцією на рівні посилянь. На кожному рівні дані передаються за допомогою багатоходової стратегії від джерела до пункту призначення. На основі згаданої раніше політики маршрутизації з максимальним D-стрибком дані пересилаються від вузла l -го рівня до найближчого $(l+1)$ -го рівня за допомогою багатоходового зв'язку на етапі передачі вгору, і навпаки для передачі вниз з $(l+1)$ -го рівня до l -го рівня. Крім того, один вузол $l+1$ -го рівня здатний використовувати Multi-User MIMO (MU-MIMO), щоб починати M_{l+1}/M_l маршрути одночасно для передачі вгору та передачі вниз. Для передачі на тому ж рівні один вузол l -го рівня може пересилати дані іншому сусідньому вузлу лише за один часовий проміжок.

Усі три типи передачі даних на l -му рівні, відповідно до політики маршрутизації з максимальним D-стрибком, відбуваються між двома сусідніми комірками або в одній і тій самій комірці, коли вузол l -го рівня та його відповідний вузол призначення $l+1$ -го рівня знаходяться в одній комірці для передачі вгору або навпаки для передачі вниз. Таким чином, можна використовувати часовий або

частотний поділ для зменшення надмірної інтерференції або сильних зіткнень та задовольнити обмеження напівдуплексу (HD) [18]. Зокрема, припускаючи, що максимальна кількість інтерферуючих комірок на l -му рівні є Δc_l , тоді можна використовувати $(1 + \Delta c_l)$ -TDMA, де комірки l -го рівня чергуються активністю в кожному з $(1 + \Delta c_l)$ часових слотів [1].

Нині MIMO стало ключовою технологією для підвищення продуктивності бездротових мереж, використовуючи посилення ступеня свободи (DoF), посилення потужності та посилення різноманітності [19]. Зокрема, посилення різноманітності спрямоване на підвищення надійності переданого сигналу шляхом розподілу того самого сигналу через два або більше некорельовані комунікаційні канали, що призводить до покращення продуктивності декодування імовірності помилки (BER), що мало впливає на збільшення ємності каналу. Таким чином, розглянемо наступні дві схеми передачі з використанням MIMO.

Просторове мультиплексування. Коли воно використовується, кілька незалежних потоків даних можуть передаватися одночасно. Було показано в [20] і [21], що, використовуючи просторове мультиплексування для передачі даних, можна досягти посилення DoF M для одношарової сіткової мережі з вузлами, кожен з яких оснащений M антенами. У загальному випадку, можна отримати максимальне посилення DoF $N_m = \min(N_t, N_r)$, де N_t і N_r - це кількість антен на передавачі та приймачі відповідно [19]. Щоб зменшити надмірну інтерференцію між рівнями, що виникає від одночасних передач на різних рівнях, можна припустити що частотний поділ використовується в цій схемі, тобто ортогональні частотні смуги виділяються для передачі даних на різних рівнях. Для передачі даних на кожному рівні використовується часовий або частотний поділ для зменшення інтерференції між рівнями. Можна сказати, що використовуючи схему просторового мультиплексування, можна підвищити пропускну здатність на вузол бездротових сіткових мереж, збільшуючи радіус передачі кожного посилення, так що деградацію пропускну здатності через спільне використання каналу можна певною мірою компенсувати.

Формування променя (Beamforming). У цьому сценарії, на кожному стрибку,

вузол-джерело передає один потік даних до свого пункту призначення. У схемі формування променя можливо, щоб кожна пара комунікаційних вузлів передавала дані за допомогою вузьких променів, так що енергія передачі концентрується в напрямку приймаючого вузла і надмірна інтерференція до сусідніх одночасно приймаючих вузлів може бути зменшена [20]. Таким чином, як внутрішньорівнева, так і міжрівнева інтерференція можуть бути обмежені константою, тобто $O(1)$. У такий спосіб, повторне використання частот серед багатьох рівнів є можливим. Було показано в [20], що для одношарової сіткової мережі з вузлами, кожен з яких оснащений M антенами, виграш потужності, який може бути отриманий від формування променя, дорівнює M^2 . У загальному випадку, система MIMO з $N_t \times N_r$ може забезпечити підвищення потужності [19]. Більше того, використовуючи збільшення потужності, надані формуванням променя, радіус передачі бездротових вузлів можна збільшити так, що передача даних кожної пари S-D у сітчастій мережі може бути завершена за меншу кількість стрибків. Відповідно, проблема спільного використання каналу полегшується, і необхідні вузли ретрансляції можуть бути зменшені порівняно з тією схемою, що використовує просторове мультиплексування. Використання формування променя може не лише зменшити інтерференцію, але також полегшити проблему спільного використання каналу, збільшуючи радіус передачі.

2.4.3 Досяжна пропускна здатність на вузол

Теорема 2. (Просторове мультиплексування) Для запропонованої багатошарової ієрархічної архітектури для сітчастої мережі з n вузлами даних з параметрами мережі, що масштабуються відповідно до Таблиці I, пропускна здатність на вузол під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком, використовуючи схему просторового мультиплексування, є

$$R^{SM}(n) = \min_{\{1 \leq l \leq L\}} \{\Theta^{(l\psi + v - k)}\}.$$

Теорема 3. (Формування променя) Для запропонованої багатошарової ієрархічної

архітектури для сіткової мережі з n вузлами даних з параметрами мережі, що масштабуються відповідно до таблиці 2.1, пропускна здатність на вузол під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком, використовуючи схему формування променя, є

$$R^{BF}(n) = \min_{\{1 \leq l \leq L\}} \{\Theta(v^{l^2 + v/\alpha} l^{-k} \log l)\}.$$

2.4.4 Просторове мультиплексування

На основі вищезазначеної процедури виведення пропускної здатності на вузол для багат шарової сіткової мережі перше, що потрібно зробити, це визначити кількість потоків даних, що проходять через кожен рівень. Для спрощення розглянемо потік даних випадково обраної пари S-D і проаналізуємо ймовірність того, що потік даних випадково обраної пари S-D проходить через l -й рівень, позначений Q_l . Під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком середня кількість потоків даних, що проходять через l -й рівень, позначена N_l , може бути отримана як

$$N_l = Q_l N_{S-D}. \quad (20)$$

З політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком потік даних не використовуватиме ресурси l -го рівня, якщо він не проходить через l -й рівень. Метод індукції використовується для виведення Q_l . Очевидно, $Q_1 = 1$, оскільки перший стрибок кожного потоку даних завжди виконується на першому рівні. Під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком дані будуть передані на наступний вищий рівень за допомогою передачі вгору, якщо кількість стрибків між джерелом і призначенням на l -му рівні перевищує D_l .

Нехай $P_h(h_l = x)$ позначає ймовірність того, що відстань між двома комунікаційними вузлами на l -му рівні є x . З Рис. 1 можна побачити, що є $6x$ вузлів, які знаходяться на відстані x стрибків від кожного вузла на l -му рівні без

урахування краю ефекту [22]. Крайовий ефект можна ігнорувати, коли кількість вузлів дуже велика, що справедливо для нижчих рівнів. Тим не менш, кількість вузлів на вищому рівні є кінцевим числом, що викликає необхідність врахування крайового ефекту при виведенні $P_h(h_l = x)$ для великих l . Розглянемо передачу даних на першому рівні з n вузлами даних. Нехай $b_l(n_l, x)$ позначає кількість вузлів, що знаходяться на відстані x стрибків від вузла i в одношаровій сітковій мережі з n вузлами. Під припущенням випадкового і рівномірного розподілу потоків даних, тобто кожне джерело випадково вибирає інший вузол як пункт призначення на l -му рівні, можна отримати

$$P_h(h_l = x) = (1 / n_l) \sum_{i=1}^{n_l} (b_i(n_l, x) / n_l - 1)$$

що є константою, визначеною x і n . Ймовірність того, що випадково обраний потік даних, що проходить через l -й рівень, може бути завершений у l рівні під політикою маршрутизації з максимальним D -стрибком, позначена $\xi_l(n_l, D_l)$, дорівнює ймовірності того, що відстань між двома комунікаційними вузлами не перевищує D_l , тобто

$$\xi_l(n_l, D_l) = \sum_{i=1}^{n_l} P_h(h_l=x) \equiv \xi_{-1}.$$

що є константою, коли n_l і D_l є фіксованими. Можна побачити, що ξ_l представляє ймовірність того, що потік даних потребує не більше D_l стрибків для передачі на l -му рівні. Іншими словами, для потоків даних, що проходять через l -й рівень ($l < L$), ймовірність того, що їм потрібно передаватися до $(l + 1)$ -го рівня у передачах вгору, дорівнює $(1 - \xi_l)$. Таким чином, ймовірність того, що потік даних пари S-D проходить через l -й рівень Q_l , може бути визначена рекурентно. Зокрема, її можна отримати як

$$Q_{l+1} = (1 - \xi_l) Q_l, l = 1, \dots, L - 1.$$

Нехай $N_{i,j}$ позначає кількість стрибків для передачі даних потоку j на l -му рівні, якщо він проходить через l -й рівень. Подібно до одношарового випадку, кожен вузол у багатошаровій сітчастій мережі використовує метод часової дивізії для розділення передач даних декількох потоків даних, які йому потрібно ретранслювати.

Під політикою маршрутизації з максимальним D -стрибком кількість стрибків на кожному з L рівнів для всіх n потоків даних ніколи не перевищуватиме D . Щодо l -го рівня, там є $N_l = nQ_l$ потоків даних, що проходять через нього. Серед них, дану кількість потоків даних потрібно передавати на $(l + 1)$ -й рівень через передачі вгору, залишаючи $N_l = nQ_l - nQ_{l+1}$ даних передавати за допомогою багатоходової передачі на l -му рівні. Щодо тих N_l потоків даних, переданих за допомогою багатоходової схеми на l -му рівні, можна легко побачити, що кількість стрибків між джерелом і призначенням вузла є $\Theta(D_l)$ під політикою маршрутизації з максимальним D -стрибком.

Оскільки ті потоки даних, передані на $(l+1)$ -й рівень через передачі вгору, все ще будуть передаватися назад на l -й рівень через передачі вниз з $(l+1)$ -го рівня, кількість стрибків для цих потоків даних на l -му рівні може бути розділена на дві частини. Одна - це кількість стрибків від джерела на l -му рівні до найближчого $(l+1)$ -го вузла, інша - це кількість стрибків від вузла призначення на l -му рівні до найближчого $(l+1)$ -го вузла. Можна відзначити, що один вузол $(l+1)$ -го рівня покриває площу з k комірок, що містять вузли l -го рівня. Як видно, середня кількість комірок l -го рівня, що містяться в одній комірці $(l+1)$ -го рівня, є

$$\Delta k_l = A_{l+1} / A_l = (1 + 1/l)^k.$$

Таким чином, очікувана кількість стрибків, необхідних для вузла l -го рівня для доступу до $(l+1)$ -го рівня, є $\Theta(\Delta k_l)$. Очікуване значення $N_{i,j}$ під політикою маршрутизації з максимальним D -стрибком, використовуючи просторове мультиплексування, можна виразити як

$$E[H_{i,j}^{SM}] = \begin{cases} \xi_l^{(0)} \Delta k_l, & \text{для потоків даних у напрямку вгору,} \\ \xi_l^{(0)} D_l, & \text{для потоків даних на тому ж рівні,} \end{cases} \quad (21)$$

де $\xi_l^{(0)}$ є двома константами зі шкалою $O(1)$.

Нехай $Z_{l,i}$ позначає кількість потоків даних, які вузлу i на l -му рівні потрібно допомогти передавати під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком у багат шаровій сітчастій мережі. На основі рівняння, загальна кількість потоків даних для n_l вузлів на l -му рівні для передачі дорівнює сумі кількості стрибків на l -му рівні, можна отримати наступним чином

$$\sum_{i=1}^{n_l} Z_{l,i} = \sum_{j=1}^{N_l} H_{i,j}$$

Взявши математичні очікування з обох сторін, отримаємо

$$\sum_{i=1}^{n_l} E[Z_{l,i}] = \sum_{j=1}^{N_l} E[H_{i,j}] \quad (22)$$

Таким чином, кількість потоків даних, які вузлу i на l -му рівні потрібно передавати, за схемою просторового мультиплексування, можна визначити як

$$E[Z_{l,i}^{SM}] = \frac{n_{Q_{l+1}} \xi_l^{(0)} \Delta k_l + n_{(Q_l - Q_{l+1})} \xi_l^{(0)} D_l}{n/l^k} = l^k (Q_{l+1} \xi_l^{(0)} \Delta k_l + (Q_l - Q_{l+1}) \xi_l^{(0)} D_l).$$

Оскільки Q_l , Q_{l+1} , $\xi_l^{(0)}$ є константами, щоб мінімізувати кількість потоків даних, які потрібно передавати кожному вузлу, D_l слід записати як $D_l = \Theta(\Delta k_l)$. Наприклад, ми вибираємо

$$D_l = \Delta k_l = (1 + 1/l)^{k/2}. \quad (23)$$

Підставивши (23) назад, отримаємо

$$E[Z_{l,i}^{SM}] = \Theta((l^2 + l)^{k/2}) = \Theta(l^k).$$

Оскільки кількість стрибків для кожного потоку даних на l -му рівні обмежена константою під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком, одношарова багатоходова передача завершується на локальному рівні, так само як і передачі вгору та вниз. Таким чином, надмірне навантаження трафіку можна рідко спостерігати на кожному вузлі з високою ймовірністю. Таким чином, верхня межа кількості потоків даних, які вузлу на l -му рівні потрібно передати $Z_{l,i}^{(U,SM)}$ за схемою просторового мультиплексування, можна написати як

$$E[Z_{l,i}^{(U,SM)}] = \Theta(l^k). \quad (24)$$

Оскільки всі три типи передачі даних кожного рівня відбуваються в тій же комірці або між двома сусідніми комірками, максимальна кількість інтерферуючих сусідніх комірок для конкретного зв'язку обмежена константою, тобто

$$\Delta c_t^{(SM)} = O(1). \quad (25)$$

Коли ортогональні частотні смуги виділяються для різних рівнів для передачі даних, міжрівнева інтерференція за схемою просторового мультиплексування повністю скасовується. Щоб бути точним, ширина смуги для передачі даних l -го рівня є W_l . Розглядаючи три типи передачі даних на l -му рівні, передача на тому ж рівні може розглядатися як система точка-точка $M_i \times M_i$ MIMO, тоді як передача вгору до $(l+1)$ -го рівня та передача вниз з $(l+1)$ -го рівня можуть розглядатися як висхідний та низхідний канали системи MU-MIMO з $M_{l+1}/M_i = (1+1/l)^v$ користувачів та однією базовою станцією (BS) [18], де кожен користувач має M_i антен, а BS має M_{l+1} антен. Як видно, під політикою маршрутизації з максимальним D-стрибком, передача даних на кожному рівні подібна до одношарової сіткової мережі. Позначимо $\gamma_t^{(L,SM)}$ нижню межу SINR отриманого сигналу на l -му рівні, використовуючи просторове мультиплексування. Коли часовий поділ використовується для зменшення міжрівневої інтерференції l -го рівня, тобто кожен вузол активний лише в одному з кожних $(1+\Delta c_l)$ часових слотів. Відповідно,

передача даних кожного рівня обмежена інтерференцією, і SINR отриманого сигналу масштабується як $\Omega(1)$ [14], тобто

$$\gamma_l^{(L,SM)} = \Omega(1).$$

Цей результат діє, коли використовується частотний поділ, тобто рівномірно розділяючи ширину смуги l -го рівня W_l на $(1+\Delta c_l)$ сегменти та рівномірно виділяючи сегменти по мережі, що показує подібний ефект із стратегією поділу часу. Оскільки посилення DoF $N_{\min} = \min\{N_t, N_r\}$ можна отримати у системі $N_t \times N_r$ МІМО, коли використовується просторове мультиплексування [19], досяжна швидкість зв'язку для передачі даних на l -му рівні, позначена $R_l^{(L,SM)}$, можна визначити як

$$R_l^{(L,SM)} = \Theta(M_i W_i) = \Theta(M_i l^{\psi+v}). \quad (26)$$

Підставляючи (24), (25) і (26) у (18), досяжна кінцева швидкість для l -го рівня під схемою поділу частоти може бути отримана як

$$R_l^{(SM)}(n) = \Theta(M_i W_i l^{\psi+v} / l^k) = \Theta(l^{\psi+v-k}). \quad (27)$$

Таким чином, пропускна здатність на вузол для багат шарової сітчастої мережі, використовуючи поділ частоти серед різних рівнів, може бути виведена підставивши (27) у (19), тобто

$$R^{(SM)}(n) = \min_{1 \leq l \leq L} (\Theta(l^{\psi+v-k})), \quad (28)$$

що завершує доказ Теорема 2.

2.4.5 Формування променя (Beamforming)

У цьому сценарії передбачається, що всі вузли в багат шаровій сітчастій

мережі використовують формування променя для передачі одного потоку даних, де енергія передачі концентрується в певному напрямку, спрямованому на приймаючий вузол, що викликає меншу інтерференцію для інших одночасно передавальних вузлів. Використовуючи прирост потужності, забезпечений формуванням променя, радіус передачі бездротових вузлів можна збільшити, як показано в [20]. Зокрема, коли кожен вузол оснащений M антенами, можна забезпечити прирост потужності M^2 . Тоді радіус передачі можна отримати, вирішуючи рівняння

$$CPM^2 r_0^{-\alpha} = P_0,$$

що в свою чергу дає

$$r_0 = (CP / P_0)^{1/\alpha} M^{2/\alpha} / a = M^{2/\alpha} r_0.$$

Як видно, радіус передачі збільшується у $M^{2/\alpha}$ разів. Таким чином, очікувана кількість стрибків, необхідних на l -му рівні, може бути зведена до частки від тієї, що є в схемі просторового мультиплексування, тобто

$$E[H_{i,j}^{(BF)}] = \frac{E[H_{i,j}^{(SM)}]}{M_i^{2/\alpha}} = M_i^{2/\alpha} E[H_{i,j}^{(SM)}], \quad (29)$$

де $E[H_{i,j}^{(SM)}]$ було виведено в (21). Підставивши (29) у (22), отримаємо, що

$$E[H_{i,j}^{(BF)}] = \Theta(t^{k/Mi^{2/\alpha}}) = \Theta(t^{k-2/\alpha}).$$

Подібним чином, верхня межа кількості потоків даних, які будь який вузол на l -му рівні повинен передати $Z_{l,i}^{(U)}$, під схемою формування променя, можна взяти як

$$Z_l^{(U,BF)} = \Theta(l^{k-2v/\alpha l}).$$

Порівняно з (24), можна побачити, що

$$Z_l^{(U,BF)} \leq Z_l^{(U,SM)}, \quad (30)$$

оскільки α_l та ν є позитивними константами. Отже, кожному вузлу потрібно допомогти передати менше потоків даних, використовуючи формування променя, тобто проблема спільного використання каналу ще більше полегшується.

Аналогічно, оскільки передача даних кожного рівня здійснюється між двома сусідніми комірками або в тій самій комірці, максимальна кількість інтерферуючих сусідніх комірок для зменшення надмірної інтерференції та задоволення обмеження напівдуплексу, для конкретного зв'язку під схемою формування променя, також обмежена константою, тобто

$$\Delta c_t^{(BF)} = O(1). \quad (31)$$

Розглянемо середовище з високим рівнем SNR, де потужність шуму є незначною порівняно з потужністю передачі P_l для $l = 1, \dots, L$. Коли використовується формування променя, можна вважати, що інтерференція, яку зазнає кожен приймаючий вузол, є набагато меншою порівняно з потужністю передачі, тобто потужність інтерференції масштабується як $O(1)$. Нехай $\gamma_t^{(L,BF)}$ позначає нижню межу SINR отриманого сигналу на l -му рівні, використовуючи схему формування променя. Можна вивести, що

$$\gamma_t^{(L,BF)} = \Theta(C_l M_i^2 P_i d_l^{-\alpha_l}),$$

де d_l представляє очікувану відстань між передавачем і приймачем l -го рівня; α_l та C_l є показником втрат на шляху та константою, що визначається частотою, профілем антени тощо, відповідно до l -го рівня. Оскільки система $N_t \times N_r$ MIMO може забезпечити виграш потужності $N_t N_r$, коли використовується формування променя, нижню межу швидкості передачі зв'язку, позначену $R_l^{(L,BF)}$, можна

вивести рівня SNR як

$$R_l^{(L,BF)} = \Theta(W_l \log(C_l M_i^2 P_i d_l^{-\alpha_l})) = \Theta(W_1 l^\psi \log(M_i^2 l^{2\nu} P_i)) = \Theta(\nu l^\psi \log l). \quad (32)$$

де (а) безпосередньо виходить з (15).

Підставляючи (30), (31) і (32) в (18), досяжна швидкість з'єднання для l -го рівня при використанні формування променя, позначена як $R_l^{(BF)}(n)$, може бути отримана як

$$R_l^{(BF)}(n) = \Theta\left(\frac{\nu l^\psi \log l}{l^{k-2/\alpha_l}}\right) = \Theta\left(\nu l^{\psi+2\nu/\alpha_l-k \log l}\right). \quad (33)$$

Підставляючи (33) у (19), пропускна здатність на вузол для багатошарової сіткової мережі під схемою формування променя може бути отримана як

$$R^{(BF)}(n) = \min_{1 \leq l \leq L} (\Theta(\nu l^{\psi+2\nu/\alpha_l-k \log l})), \quad (34)$$

що завершує доказ Теорема 3.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ МАСШТАБУВАННЯ

3.1 Умови масштабованості для багат шарової сіткової мережі

У попередньому розділі я отримав пропускну здатність на вузол багат шарової сітчастої мережі за обох схем просторового мультиплексування та формування променя. Результати залежать від масштабування порядків виділення смуги пропускання, передавальної потужності та кількості антен. Як показано в (19), пропускну здатність на вузол багат шарової сіткової мережі $R(n)$ визначається як мінімум кінцевої швидкості $R_l(n)$ для $1 \leq l \leq L$. Щоб отримати масштабовану пропускну здатність на вузол $\Theta(1)$, $R_l(n) = \Omega(1)$ має бути виконано для $1 \leq l \leq L$, тобто умови для багат шарової сіткової мережі для досягнення масштабованості пропускну здатності такі:

$$R_l(n) = \Omega(1), l=1, 2, \dots, L. \quad (35)$$

3.1.2 Умови масштабованості для просторового мультиплексування

Кінцева швидкість для l -го рівня при використанні схеми просторового мультиплексування $R_l^{(SM)}(n)$ була виведена в (27). Як видно, вона масштабується в порядку l до степеня $\psi + \nu - k$, що визначається співвідношеннями масштабування смуги пропускання, кількості антен та кількості вузлів. Очевидно, для першого рівня з $l=1$, кінцева швидкість $R_l^{(SM)}(n) = \Theta(M_i W_i) = \Theta(1)$ що залишається масштабованою, якщо виділена смуга пропускання W_i та кількість антен M_i фіксовані. Для верхніх рівнів, підставляючи

$$R_l^{(SM)}(n) = \Theta(l^{\psi + \nu - k})$$

в (35), щоб досягти масштабованої пропускну здатності, використовуючи схему

просторового мультиплексування, повинно бути виконано

$$\psi + \nu \geq k, \quad (36)$$

щоб забезпечити $R_l^{(SM)}(n) = \Omega(1)$, оскільки таким чином,

$$l^{\psi + \nu - k} \geq 1,$$

і, отже, пропускна здатність на вузол багат шарової сітчастої мережі, отримана шляхом взяття мінімального значення $R_l^{(SM)}(n)$ від $l = 1$ до L , є масштабованою, оскільки n збільшується.

Хочеться сказати, що (36) припускає, що для досягнення масштабованої пропускної здатності, вищі рівні ретрансляції не повинні стати вузьким місцем мережі. Вони повинні бути здатні обробляти передачу даних з нижчих рівнів. Для досягнення цього, сума збільшення смуги пропускання при зростанні ψ а збільшення кількості антен при зростанні ν , тобто $\psi + \nu$ повинно бути не менше зменшення кількості вузлів k . З іншого боку, щоб досягти масштабованої пропускної здатності, порядок масштабування кількості необхідних вузлів ретрансляції, розгорнутих на кожному рівні k , повинен бути принаймні рівний $\psi + \nu$.

3.1.3 Умови масштабованості для формування променя

Кінцева швидкість для l -го рівня при використанні схеми формування променя $R_l^{(BF)}(n)$ була отримана в (33). Як видно, $R_l^{(BF)}(n)$ масштабується в порядку l до степеня $\psi + 2\nu / \alpha_l - k$ разом з логарифмом l . Подібно до першого рівня з $l = 1$, кінцева швидкість $R_1^{(BF)}(n) = \Theta(W_1 \log M_1^2) = \Theta(1)$, що залишається незмінною, якщо виділена смуга пропускання W_1 та кількість антен M_1 є визначеними. Оскільки частотні смуги можуть бути розділені серед кількох рівнів за схемою формування променя, еквівалентний показник втрат на шляху, скажімо, α_1 , можна прийняти для зручності. Щоб забезпечити $R_l^{(BF)}(n) = \Omega(1)$ для верхніх рівнів, підставляючи

$$R_l^{(BF)}(n) = \Theta (\nu l^{\psi + 2\nu/\alpha - k} \log l)$$

в (35), можна досягти масштабованої пропускної здатності при використанні схеми формування променя, якщо

$$\psi + 2\nu/\alpha \geq k. \quad (37)$$

Таким чином, $R_l^{(BF)}(n) \geq R_{l-1}^{(BF)}(n)$ для $l = 2, \dots, L$ і тому $R_l^{(BF)}(n) = R^{(BF)}(n) = \Theta(1)$, що означає, що може бути досягнута масштабована пропускна здатність на вузол.

З (37), щоб досягти масштабованої пропускної здатності, сума збільшення смуги пропускання порядку ψ та кількості антен порядку ν разів $2/\alpha$, тобто $\psi + 2\nu/\alpha$, повинна бути не меншою за зменшувальний порядок кількості вузлів k . З іншого боку, щоб досягти масштабованої пропускної здатності, порядок масштабування кількості необхідних вузлів ретрансляції, розгорнутих на кожному рівні k , повинен бути принаймні рівним $\psi + 2\nu/\alpha$.

3.1.4 Роз'яснення щодо масштабованості сітчастих мереж

Припустимо, що $k \geq 2$ виконується для забезпечення збіжності загальної кількості вузлів. З умов масштабованості (36) та (37), необхідна смуга пропускання та кількість антен повинні зростати до нескінченності при $n \rightarrow \infty$. Більше того, (17) вказує на те, що потужність передачі найвищого рівня також має зростати експоненціально разом із n . Підсумовуючи, пропускну здатність $\Theta(1)$ для безперервно розширюваної мережі можна досягти лише при необмежених ресурсах. Однак це нездійсненно та непрактично для такої безмежної експансії розмірів мережі в реалістичному сценарії. Область розгортання для бездротової мережі завжди обмежена на практиці. Коли область розміру бездротової мережі досягає певного значення, передбачається, що вона отримує доступ до провідної мережі (тобто Інтернету), і таким чином встановлює гібридну мережеву архітектуру для комунікації. Закони масштабування пропускної здатності для гібридних мереж вже досліджувалися в [23, 14, 24, 25, 26, 22, 27]. Їхні результати

вказують на те, що, використовуючи високу пропускну здатність, надану провідними з'єднаннями, досяжна масштабована кінцева швидкість між двома бездротовими вузлами є досяжною. Однак масштабованість пропускну здатності бездротової частини в гібридній мережі не є повністю вирішеною. Для вирішення цього питання є роз'яснення щодо масштабованості сітчастих мереж у даній роботі. Зокрема, є можливість розгортання бездротової сітчастої мережі з масштабованою пропускну здатністю за наявних ресурсів, при цьому роблячи розмір мережі якомога більшим. Іншими словами, пропускну здатність на вузол $\Theta(1)$ гарантовано для бездротової частини мережі, розгорнутої в такій обмеженій області, без урахування провідних вузлів.

3.2 Моделювання масштабованості багат шарової сітчастої мережі

Тут ми представляємо випадок дослідження для дослідження практичності запропонованої багат шарової сіткової архітектури в реалістичному розгортанні. Розглянемо круговий регіон, у якому розташовано 10 000 вузлів даних. Я виявив, що $k = 8$, $\psi = 4$ і $v = 4$ може отримати можливі мережеві параметри під схемою просторового мультиплексування, зберігаючи при цьому масштабованість пропускну здатності. Як показано в таблиці 3.1, встановлено трирівневу сіткову мережу з $n_2 = 10^4 / 2^8 = 39$ та $n_3 = 10^4 / 3^8 = 2$. Припустимо, що показники втрат на шляху для всіх трьох рівнів дорівнюють 3, а підсилення антен дорівнює $C_1 = 3$ dB, $C_2 = 6$ dB та $C_3 = 9$, відповідно. Якщо кожен вузол даних має потужність передачі 1 мВт, мінімальна потужність отриманого сигналу для досягнення дальності передачі 50 м становить $P_1^0 = -78$ dBm (визначено за (15)), що є розумним значенням на практиці. Радіус мережі складає приблизно $50 \times 10000 / \pi = 2.8$ км. Необхідну дальність передачі другого і третього рівнів можна визначити за (16), тобто, $d_2 = 50 \times 2^4 = 800$ м і $800 \times 1.4^4 = 4.05$ км. Необхідна потужність передачі для вузлів на другому і третьому рівнях складає 2 Вт і 13 Вт, припускаючи, що $P_2^0 = P_3^0 = P_1^0 = -78$ dBm. Виділяємо смугу пропускання 10 МГц для першого рівня, тоді як необхідна смуга пропускання для другого і третього рівнів складає 160 МГц і 810

МГц відповідно, що є розумними параметрами для мереж 5G або 6G, де можна використовувати високочастотні смуги, такі як mmWave та терагерци. Крім того, припускаючи, що кожен вузол даних оснащений однією антеною, необхідні числа антен для вузлів ретрансляції на другому і третьому рівнях становлять 16 та 81 відповідно, що також є здійсненним у реалістичному розгортанні. Усі вищезазначені результати підсумовані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри мережі для $n=10000$ за схемою просторового мультиплексування

Рівень мережі	1	2	3
Кількість вузлів (n_i)	10,000	39	2
Підсилення антени (C_i)	3 dB	6 dB	9 dB
Потужність передачі (P_i)	1 мВт	2 Вт	13 Вт
Смуга пропускання (W_i)	10 МГц	160 МГц	810 МГц
Кількість антен (M_i)	1	16	81

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розглянуто протоколи бездротових мереж, такі як Wi-Fi, ZigBee, LTE та 5G. Було розглянуто їх плюси, недоліки, а також архітектури на основі яких будуються дані мережі. Також було встановлено, що інтерференція та спільне використання каналу являються двома ключовими факторами, що обмежують масштабованість бездротових мереж. Багатошарова ієрархічна архітектура сітчастої мережі була розроблена для вирішення проблеми спільного використання каналу. У поєднанні з деякими схемами зменшення інтерференції було доведено, що масштабована пропускна здатність на вузол $\Theta(1)$ є досяжною в багатошаровій мережі за умови виконання певних умов щодо смуги пропускання, кількості антен та потужності передачі. Випадок дослідження також продемонстрував здійсненність багатошарової сіткової мережі в реалістичному розгортанні. Також було доказано що дана мережева архітектура, являється одним із найкращих методів масштабування, який може застосовуватись як для Wi-Fi, так і для мобільних мереж, завдяки універсальним технологіям, які цей метод використовує, а саме просторове мультиплексування, та Beamforming.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, 2000.
2. I. F. Akyildiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. S23–S30, 2005.
3. M. A. Al-Jarrah, E. Alsusa, A. Al-Dweik, and M.-S. Alouini, "Performance analysis of wireless mesh backhauling using intelligent reflecting surfaces," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 3597–3610, 2021.
4. Z. Li, L. Xiang, X. Ge, G. Mao, and H.-C. Chao, "Latency and reliability of mmwave multi-hop V2V communications under relay selections," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 9, pp. 9807–9821, 2020.
5. B. L. Nguyen, D. T. Ngo, M. N. Dao, V. N. Q. Bao, and H. L. Vu, "Scheduling and power control for connectivity enhancement in multi-hop I2V/V2V networks," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 8, pp. 10 322–10 332, 2022.
6. 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Study on NR sidelink relay (Release 17)," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.836, 05 2021, Version 17.0.0.
7. M. Franceschetti, O. Dousse, D. N. C. Tse, and P. Thiran, "Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 1009–1018, 2007.
8. A. Ozgur, O. Leveque, and D. N. C. Tse, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3549–3572, 2007.
9. M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 3, 2001, pp. 1360–1369 vol.3.
10. A. Ozgur, R. Johari, D. N. C. Tse, and O. Leveque, "Information-theoretic operating regimes of large wireless networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 56, no. 1, pp. 427–437, 2010.

11. L.-L. Xie and P. R. Kumar, "A network information theory for wireless communication: scaling laws and optimal operation," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 50, no. 5, pp. 748–767, 2004.
12. O. Leveque and I. E. Telatar, "Information-theoretic upper bounds on the capacity of large extended ad hoc wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 3, pp. 858–865, 2005.
13. L. Lei, A. Tang, and X. Wang, "Analysis on the scalability issues of wireless mesh networks: Key factors and potential solutions," in *Proc. IEEE MASS*, 2022, pp. 586–591.
14. W.-Y. Shin, S.-W. Jeon, N. Devroye, M. H. Vu et al., "Improved capacity scaling in wireless networks with infrastructure," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 57, no. 8, pp. 5088–5102, 2011.
15. M. Mitzenmacher and E. Upfal, *Probability and Computing: Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis*. Cambridge Univ., 2005.
16. P. Li, C. Zhang, and Y. Fang, "Capacity and delay of hybrid wireless broadband access networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 117–125, 2009.
17. D. M. Shila, Y. Cheng, and T. Anjali, "Throughput and delay analysis of hybrid wireless networks with multi-hop uplinks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2011, pp. 1476–1484.
18. F. Gómez-Cuba, S. Rangan, and E. Erkip, "Scaling laws for infrastructure single and multihop wireless networks in wideband regimes," in *Proc. IEEE ISIT*, 2014, pp. 76–80.
19. D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge Univ., 2005.
20. H. S. Dhillon and G. Caire, "Scalability of line-of-sight massive MIMO mesh networks for wireless backhaul," in *Proc. IEEE ISIT*, 2014, pp. 2709–2713.
21. C. Jiang, Y. Shi, Y. T. Hou, and S. Kompella, "On the asymptotic capacity of multi-hop MIMO ad hoc networks," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 10, no. 4, pp. 1032–1037, 2011.

22. R. Hou, Y. Cheng, J. Li, M. Sheng, and K.-S. Lui, "Capacity of hybrid wireless networks with long-range social contacts behavior," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 25, no. 2, pp. 834–848, 2017.
23. P. Zhou, X. Wang, and R. Rao, "Asymptotic capacity of infrastructure wireless mesh networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 7, no. 8, pp. 1011–1024, 2008.
24. A. Zemlianov and G. de Veciana, "Capacity of ad hoc wireless networks with infrastructure support," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 657–667, 2005.
25. B. Liu, Z. Liu, and D. Towsley, "On the capacity of hybrid wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 2, 2003, pp. 1543–1552 vol.2.
26. U. C. Kozat and L. Tassiulas, "Throughput capacity of random ad hoc networks with infrastructure support," in *Proc. ACM Mobicom*, 2003.
27. W. Fu and D. P. Agrawal, "Capacity of hybrid wireless mesh networks with random aps," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 12, no. 1, pp. 136–150, 2013.
28. S. Haykin, "Communication Systems", Wiley, 5th edition ISBN: 978-1118324561. pp. 345-356, 2006.
29. CSA Conectivity Standarts Aliance. URL: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>
30. Rodrigues, J. A. F., et al. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies J. A. F. Rodrigues, et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. vol. 23, no. 2. pp. 84-101.

Додаток А

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій
Кафедра Комп'ютерної інженерії

**«Дослідження протоколів бездротових мереж для
підвищення їхньої масштабованості та надійності»**

Виконав студент групи КІД-42
Ковшуненко Євгеній Олександрович
Керівник кваліфікаційної роботи:
Сосновий Владислав Олексійович,
асистент кафедри КІ

Київ – 2024

- *Мета роботи* – встановити ключові фактори, що впливають на масштабованість та надійність протоколів бездротових мереж, і визначити способи їх оптимізації.
- *Об'єкт дослідження* – мережі, що використовують бездротові технології для передачі даних.
- *Предмет дослідження* – протоколи бездротового зв'язку (Wi-Fi, LTE, 5G), їх характеристики, проблеми масштабованості та надійності, а також фактори, що впливають на їх ефективність.

Актуальність обраної теми

У сучасному світі бездротові мережі стають все більш важливими для забезпечення постійного та швидкого доступу до інтернету та зв'язку між пристроями. З розвитком технологій і зростанням кількості підключених пристроїв виникає необхідність у підвищенні масштабованості та надійності цих мереж. Аналіз та оптимізація протоколів бездротового зв'язку є ключовими для забезпечення ефективної роботи мереж у різних умовах експлуатації, що робить цю тему надзвичайно актуальною для дослідження.

Протоколи бездротових мереж

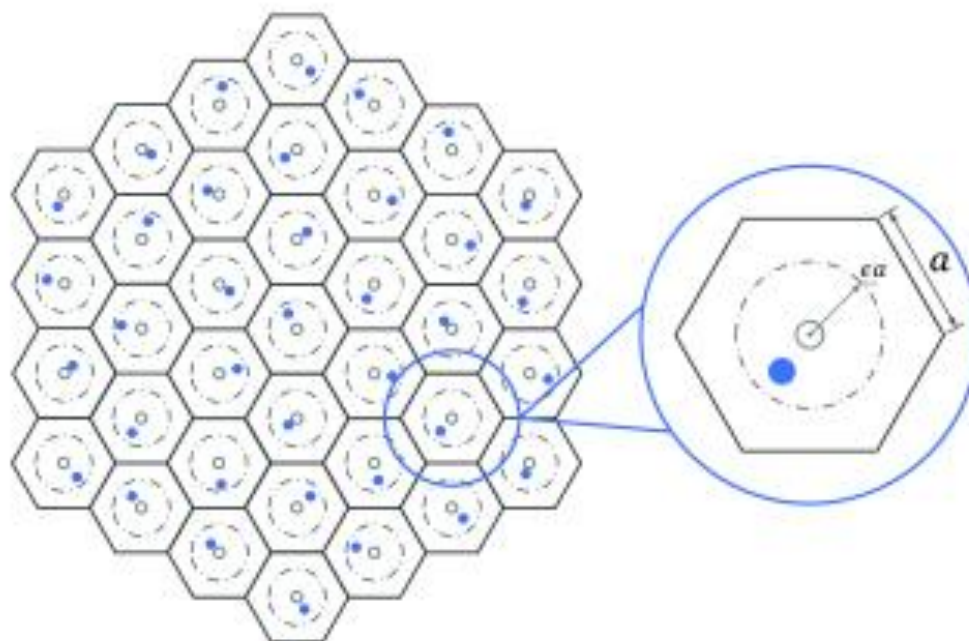
- Wi-fi (Wireless Fidelity) - IEEE 802.11
- LTE (Long-Term Evolution) - 3GPP 8
- 5G (Fifth Generation) - 3GPP 15
- ZigBee - IEEE 802.15.4
- Bluetooth - IEEE 802.15.1



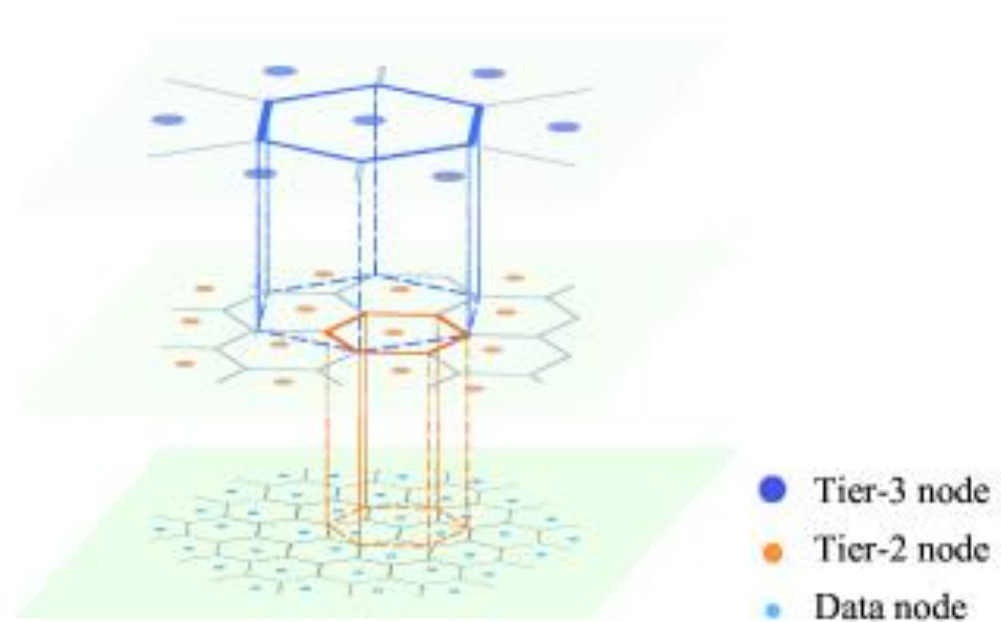
Основні проблеми бездротових мереж що впливають на масштабованість

- Інтерференція та перешкоди
- Спільне використання каналу
- Обмежена пропускна здатність
- Алгоритми маршрутизації

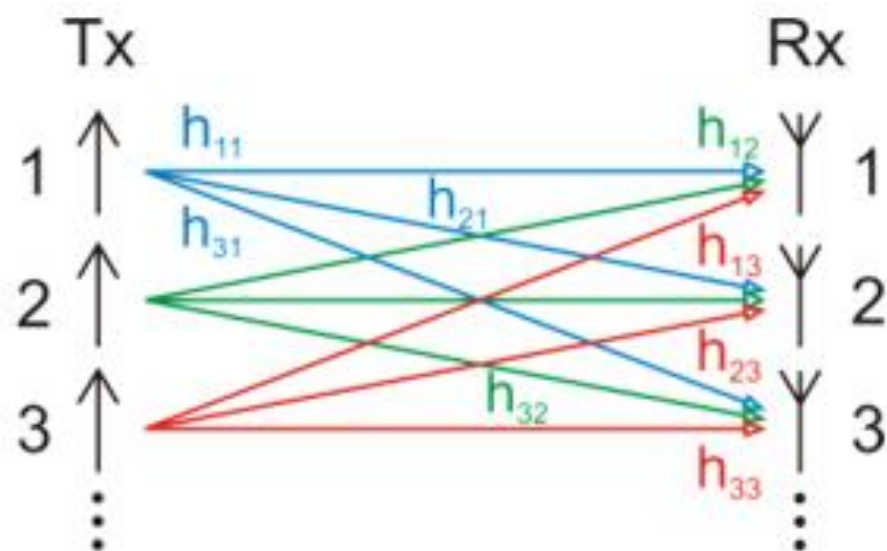
Гексагонална мрежева модель



Багаторівнева ієрархічна архітектура



Модель канала MIMO



Таблиця масштабування параметрів мережі

	Масштабування	Діапазон параметрів
Кількість вузлів (n_l)	$n_l = n/l^k$	$k \in [2, \infty]$
Пропускна здатність (W_l)	$W_l = W_1 l^\psi$	$\psi \in [1, \infty]$
Кількість антен (M_l)	$M_l = M_1 l^\nu$	$\nu \in [1, \infty]$

l - номер рівня.

k - коефіцієнт, що визначає швидкість зменшення кількості вузлів на кожному наступному рівні.

ψ - коефіцієнт, що визначає швидкість збільшення пропускної здатності на кожному наступному рівні.

ν - коефіцієнт, що визначає швидкість збільшення кількості антен на кожному наступному рівні.

Висновки

В даній бакалаврській роботі, я встановив основні фактори, які впливають на масштабованість та надійність протоколів бездротових мереж, а саме: інтерференція, пропускна здатність, щільність користувачів та алгоритми маршрутизації. Також було розглянуто гексагональну багаторівневу безпроводну mesh-мережу, яка дозволяє зменшити рівень інтерференції завдяки ефективному використанню просторових ресурсів. Використання MIMO (Multiple Input Multiple Output) забезпечує високу пропускну здатність, що є критичним фактором для підтримки великої кількості користувачів з мінімальною затримкою. Крім того, багаторівнева архітектура такої мережі дозволяє забезпечити ефективну маршрутизацію даних, зменшуючи навантаження на окремі вузли та підвищуючи надійність мережі в цілому.

Висновки

Застосування таких мереж в реальних умовах, таких як міські агломерації або великі офісні комплекси, показало їхню здатність забезпечувати стабільне з'єднання навіть при значному збільшенні кількості користувачів та пристроїв. Таким чином, гексагональна багаторівнева mesh-мережа з використанням технології MIMO є перспективним напрямком для побудови масштабованих та надійних бездротових мереж.