ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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



(підпис) Андрій СОЛОГУБ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Андрій СОЛОГУБ

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент:

Київ – 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма	Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сологубу Андрію Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах», керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор, затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. MESH-мережі.
   2. Методи розподілення каналів.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Основи безпроводових мереж Wi-Fi та технології, що у них застосовуються;
   2. Методи підвищення продуктивності безпроводової мережі;
   3. Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних mesh-мережах;

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	26.10.24	Викон.
2.	Основи безпроводових мереж Wi-Fi та технології, що у них застосовуються	29.10.24	Викон.
3.	Методи підвищення продуктивності безпроводової мережі	01.12.24	Викон.
4.	Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних mesh-мережах	02.11.24	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.24	Викон.
6.	Розробка презентації	25.12.24	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Андрій СОЛОГУБ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Сологуба Андрія Віталійовича

на тему: «Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах»

Актуальність:

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання радіочастотного спектра в багатоканальних MESH-мережах, які широко застосовуються у розумних містах, промислових IoT і системах відеоспостереження. Ієрархічні методи розподілення каналів дозволяють мінімізувати інтерференцію, оптимізувати використання каналів і підвищити пропускну здатність мережі. Вдосконалення цих методів сприяє забезпеченню стабільної та надійної роботи MESH-мереж навіть в умовах високого навантаження та динамічної зміни топології.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. Уточнити роль фізичного рівня в забезпеченні стабільності мереж Wi-Fi, зокрема детальніше описати методи модуляції, такі як QPSK, 16-QAM, 64-QAM, та їхній вплив на продуктивність.

2. Варто детально проаналізувати потенційні виклики, пов'язані з масштабованістю запропонованого ієрархічного методу, зокрема щодо енергоспоживання та управління інтерференцією в густонаселених зонах.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Сологуб Андрій Віталійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: д.т.н., проф. Вікторія Мєдова

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

Направляється здобувач Сологуб А.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Сологуб Андрій Віталійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Сологуба Андрія Віталійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Сологуб А.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 71 стор., 9 рис., 7 табл., 32 дж.

Метою роботи є дослідження методів підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах.

Об'єктом дослідження є процес передачі даних у Wi-Fi мережах.

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах.

Короткий зміст роботи: У першому розділі досліджено еволюцію технології Wi-Fi та розвиток стандартів, що вплинули на продуктивність і ефективність мереж. Охарактеризовано ключові переваги кожного покоління, зокрема збільшення швидкості, зниження затримок і розширення частотних діапазонів. Розглянуто роль кожного рівня моделі OSI у забезпеченні стабільності та безпеки Wi-Fi-мереж, із акцентом на фізичний і канальний рівні. Підсумовано, що оптимальний розподіл частотних ресурсів зменшує інтерференцію й підвищує якість обслуговування.

У другому розділі запропоновано методи підвищення продуктивності Wi-Fi-мереж, зокрема використання алгоритмів маршрутизації (Dijkstra, OLSR, RIP) для зменшення затримок і балансування навантаження. Досліджено переваги MESH-мереж, які забезпечують самовідновлювану структуру, покращують пропускну здатність і стабільність з'єднань у складних умовах.

У третьому розділі досліджено централізоване, розподілене й комбіноване керування Wi-Fi-мережами. Запропоновано ієрархічний метод розподілу каналів для зменшення інтерференції та підвищення продуктивності. Модель, створена в NS3, оцінює ефективність ієрархічного методу, зокрема розподіл зон стабільного прийому та координацію між рівнями. Результати моделювання підтвердили, що запропонований підхід підвищує пропускну здатність на 15–30%, знижує затримки й забезпечує стабільність мережі навіть за умов динамічних змін.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: WI-FI, MESH-МЕРЕЖІ, МЕТОДИ РОЗПОДІЛЕННЯ КАНАЛІВ, DIJKSTRA, OLSR, RIP, ІЄРАРХІЧНИЙ МЕТОД.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 71 pages, 9 pictures, 7 table, 32 sources.

The purpose of the work is to study methods for increasing the efficiency of using hierarchical channel allocation methods in multi-channel MESH networks.

The object of the study is the process of data transmission in Wi-Fi networks.

The subject of the study is methods for increasing the efficiency of using hierarchical channel allocation methods in multi-channel MESH networks.

Summary of the work: The first section examines the evolution of Wi-Fi technology and the development of standards that have affected the performance and efficiency of networks. The key advantages of each generation are characterized, in particular, increasing speed, reducing delays and expanding frequency ranges. The role of each layer of the OSI model in ensuring the stability and security of Wi-Fi networks is considered, with an emphasis on the physical and channel layers. It is concluded that optimal allocation of frequency resources reduces interference and improves the quality of service.

The second section proposes methods for increasing the performance of Wi-Fi networks, in particular, the use of routing algorithms (Dijkstra, OLSR, RIP) to reduce delays and load balancing. The advantages of MESH networks, which provide a self-healing structure, improve bandwidth and stability of connections in difficult conditions, are investigated.

The third section, centralized, distributed and combined management of Wi-Fi networks is investigated. A hierarchical method of channel allocation is proposed to reduce interference and increase performance. The model created in NS3 evaluates the effectiveness of the hierarchical method, in particular the allocation of stable reception zones and coordination between levels. The simulation results confirmed that the proposed approach increases bandwidth by 15–30%, reduces delays and ensures network stability even under dynamic changes.

KEYWORDS: WI-FI, MESH NETWORKS, CHANNEL ALLOCATION METHODS, DIJKSTRA, OLSR, RIP, HIERARCHICAL METHOD.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ WI-FI ТА ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО У НИХ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ 11
1.1. Огляд безпроводових телекомунікаційних мереж Wi-Fi 11
1.2. Технології, що застосовуються у Wi-Fi на рівні моделі OSI 21
1.3. Особливості частотного розподілу в Wi-Fi мережах 31
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ 40
2.1. Роль маршрутизації у підвищенні продуктивності Wi-Fi мереж 40
2.2. Роль mash-мереж у підвищенні продуктивності Wi-Fi мереж 46
РОЗДІЛ 3. МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІЄРАРХІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗПОДІЛЕННЯ КАНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ 53
3.1. Класифікація методів розподілу каналів у багатоканальних MESH-мережах 53
3.2. Ієрархічний метод розподілу каналів у Wi-Fi-мережах стандарту 802.11 56
3.3. Дослідження результатів моделювання запропонованого ієрархічного методу 64
ВИСНОВКИ 70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 72
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 76

ВСТУП

Wi-Fi став невід'ємною частиною сучасного життя, забезпечуючи зручний доступ до мережі Інтернет у багатьох сферах: від домашнього користування до великих корпоративних і промислових систем. Актуальність цієї технології зростає в умовах стрімкого розвитку Інтернету речей (IoT), хмарних сервісів та мобільних застосунків, які вимагають стабільного, високошвидкісного і безпроводового зв'язку.

Здатність Wi-Fi підтримувати високу пропускну здатність, гнучке масштабування та інтеграцію з іншими мережами робить його важливим компонентом у забезпеченні цифрової трансформації. Розвиток стандартів Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 сприяє зменшенню затримок, підвищенню швидкості передачі даних та покращенню енергоефективності, що особливо важливо для сучасних розумних міст, автоматизованих виробництв і мультимедійних систем.

MESH-мережі є одним із перспективних рішень для побудови безпроводових мереж, особливо у випадках, коли необхідно забезпечити надійний та масштабований зв'язок у складних умовах або на великих територіях. Вони характеризуються гнучкістю і здатністю самостійно конфігурувати маршрути передачі даних між вузлами мережі, що робить їх ідеальними для використання в різних галузях, від смарт-міст до аварійно-рятувальних операцій. Однак, ефективне використання ресурсів у таких мережах, зокрема пропускної здатності, залишається серйозним викликом.

Одним із ключових аспектів оптимізації роботи MESH-мереж є розподілення каналів для передачі даних між вузлами. У багатоканальних MESH-мережах важливо забезпечити мінімізацію перешкод і ефективне використання доступних каналів. Ієрархічні методи розподілення каналів пропонують структуру, в якій вузли можуть динамічно та оптимально вибирати канали на основі місцевих та глобальних параметрів мережі, що дозволяє знизити затримки та підвищити загальну продуктивність.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів у багатоканальних MESH-мережах. У рамках дослідження буде проаналізовано існуючі методи розподілення каналів, вивчено їхні переваги та обмеження, а також запропоновано нові підходи до оптимізації використання каналів, що дозволять підвищити продуктивність і надійність MESH-мереж у різних умовах експлуатації.

Метою роботи є дослідження методів підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах.

Об'єктом дослідження є процес передачі даних у Wi-Fi мережах.

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ Wi-Fi ТА ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО У НИХ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ

1.1. Огляд безпроводових телекомунікаційних мереж Wi-Fi

Wi-Fi, абревіатура від Wireless Fidelity, є торговою маркою Wi-Fi Alliance, яка відноситься до бездротових мереж на основі стандарту IEEE 802.11 [1]. Ця технологія дозволяє пристроям підключатися до Інтернету та спілкуватися по бездротовій мережі на короткій відстані, забезпечуючи більшу мобільність і зручність [2]. Широке впровадження технології Wi-Fi революціонізувало спосіб доступу людей до інформації та спілкування, зробивши її фундаментальним компонентом сучасних телекомунікацій. Його простота та ефективність у встановленні бездротових з'єднань зробили Wi-Fi основним елементом як домашнього, так і бізнес-середовища, забезпечуючи безперебійне підключення для різних пристроїв, починаючи від смартфонів і закінчуючи ноутбуками.

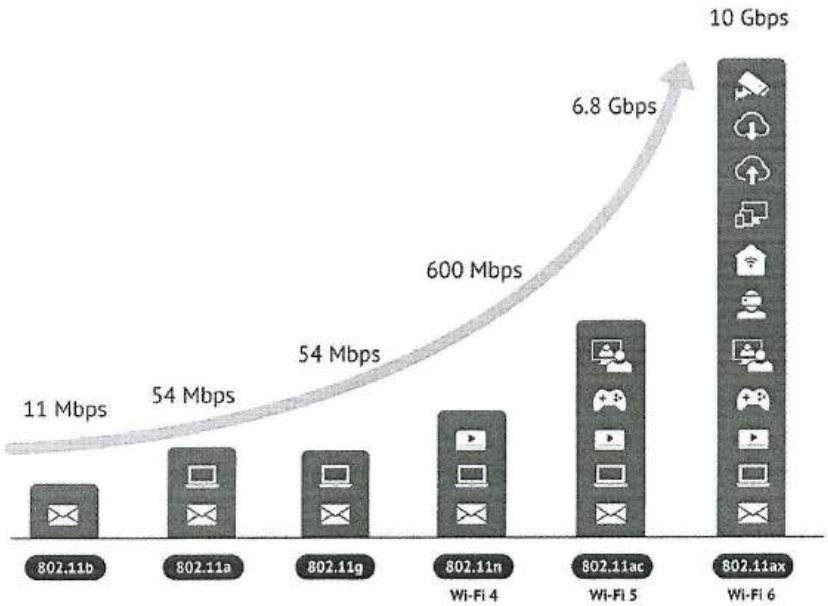


Рис. 1.1. Еволюція безпроводових мереж Wi-Fi

Ключові компоненти мереж Wi-Fi включають точки доступу, клієнтські пристрої та допоміжну інфраструктуру, яка їх з'єднує [3]. Точки доступу служать

центральними концентраторами, які полегшують зв'язок між пристроями та Інтернетом, тоді як клієнтські пристрої, такі як смартфони, планшети та комп'ютери, підключаються до цих точок доступу для доступу до мережевих ресурсів. Крім того, маршрутизатори відіграють вирішальну роль у спрямуванні трафіку між Інтернетом і локальною мережею, забезпечуючи ефективне надходження пакетів даних до призначення. Комбінація цих компонентів створює надійну бездротову мережу, здатну підтримувати роботу кількох користувачів і пристроїв одночасно, підвищуючи загальний досвід користувача.

Важливим аспектом технології Wi-Fi є її відповідність різним стандартам, встановленим IEEE, зокрема сімейству IEEE 802.11 [4]. Кожен стандарт цього сімейства, наприклад IEEE 802.11a, b і n, визначає конкретні протоколи для бездротової передачі даних, включаючи частотні діапазони та швидкості передачі даних [4]. Наприклад, стандарт IEEE 802.11n працює в частотному діапазоні 2,4–2,5 ГГц і 5,0 ГГц, пропонуючи максимальну швидкість передачі даних приблизно 480 Мбіт/с [1]. Розуміння цих стандартів має вирішальне значення для оптимізації продуктивності мережі, забезпечення сумісності між пристроями та посилення заходів безпеки, таких як ті, що описані в стандарті IEEE 802.11i, який зосереджується на надійних протоколах безпеки для бездротових мереж [4].

Історія та еволюція Wi-Fi

Ранні розробки бездротових технологій заклали основу того, що ми зараз знаємо як Wi-Fi. Концепція бездротового зв'язку сягає корінням у кінець 19 століття, але значний прогрес почався у 20 столітті. У 1990-х роках Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) створив стандарт IEEE 802.11, який ознаменував початок бездротових локальних мереж (WLAN), відомих як Wi-Fi [4]. Цей прорив дозволив передавати дані без потреби у фізичних кабелях, революціонізувавши спосіб обміну даними між пристроями. У результаті бездротові мережі почали набирати обертів як у комерційних, так і в житлових приміщеннях, відкриваючи шлях для майбутніх інновацій у бездротовому зв'язку.

Таблиця 1.1.

Порівняння технологій Wi-Fi

Технологія	Рік впровадження	Частотні діапазони	Максимальна швидкість	Ширина каналу	Ключові характеристики
Wi-Fi 1 (802.11b)	1999	2.4 GHz	11 Mbps	20 MHz	Базове з'єднання, низька швидкість
Wi-Fi 2 (802.11a)	1999	5 GHz	54 Mbps	20 MHz	Вища швидкість, підтримка 5 ГГц
Wi-Fi 3 (802.11g)	2003	2.4 GHz	54 Mbps	20 MHz	Сумісність з 802.11b, покращена швидкість
Wi-Fi 4 (802.11n)	2009	2.4 GHz, 5 GHz	600 Mbps	20, 40 MHz	MIMO, зворотна сумісність
Wi-Fi 5 (802.11ac)	2014	5 GHz	3.5 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	MU-MIMO, формування променя
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2019	2.4 GHz, 5 GHz	9.6 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	OFDMA, TWT, краща ефективність
Wi-Fi 6E (802.11ax with 6 GHz)	2020	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	9.6 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	Розширений спектр, менша затримка
Wi-Fi 7 (802.11be)	Expected 2024	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	46 Gbps	320 MHz	Надзвичайно висока пропускна здатність, розширена ефективність

Еволюція стандартів Wi-Fi відзначена кількома ключовими віхами, які покращили можливості та продуктивність мережі. Перший основний стандарт, IEEE 802.11b, був прийнятий у 1999 році та працював у діапазоні 2,4 ГГц, пропонуючи швидкість передачі даних до 11 Мбіт/с [5]. Після цього з'явився стандарт IEEE 802.11a, який запровадив роботу в діапазоні 5 ГГц із вищою швидкістю передачі даних до 54 Мбіт/с [1]. Це був значний крок вперед, оскільки він дозволив зменшити перешкоди та збільшити пропускну здатність. Пізніше IEEE 802.11n привніс ще більші вдосконалення, підтримуючи технологію кількох входів і кількох виходів (MIMO), що збільшило пропускну здатність і радіус дії. Кожна з цих віх не тільки покращила досвід користувача, але й розширила застосування бездротових мереж у різних сферах.

У міру розвитку технології перехід від оригінального стандарту 802.11 до останніх ітерацій був чудовим. Запровадження IEEE 802.11ac, також відомого як Wi-Fi 5, у 2013 році стало суттєвим прогресом, дозволивши збільшити швидкість передачі даних і покращити продуктивність у багатолюдних середовищах [6]. Після цього з'явився новітній стандарт IEEE 802.11ax або Wi-Fi 6, який підвищує ємність і ефективність, дозволяючи одночасному підключенню більшої кількості пристроїв без втрати швидкості [7]. Постійна еволюція стандартів Wi-Fi відображає зростаючий попит на швидший і надійніший бездротовий зв'язок, що адаптується до потреб світу, де зростає зв'язок. Цей перехід підкреслює важливість безперервних інновацій у вирішенні викликів, пов'язаних із сучасними програмами та очікуваннями користувачів.

Як працює Wi-Fi

Основні принципи бездротового зв'язку лежать на основі роботи мережі Wi-Fi. Wi-Fi, який також відомий як Wireless Fidelity, функціонує на основі стандартів IEEE 802.11 [4]. Ці стандарти розпочинаються, як дані передаються бездротовим способом через повітря, з використанням радіохвилі. Важливо відзначити, що Wi-Fi має властивості, подібні до некомутованого Ethernet, і може знати ці самі впливи, такі як затримки або перешкоди [8]. Це означає, що якість з'єднання може

варіюватися залежно від умов навколишнього середовища, наявність перешкод, таких як стіни або інші електронні пристрої, які можуть заважати сигналу.

Роль маршрутизаторів і точок доступу є критично важливою у створенні та підтримці мережі Wi-Fi [9]. Маршрутизатори вже виконують функцію шлюзу, що дозволяє пристроям підтримувати доступ до Інтернету, і здатні обслуговувати велику кількість підключених пристроїв [10]. У той час як точки доступу є портативними пристроями, які передають сигнал від маршрутизатора, забезпечуючи з'єднання для користувачів [11]. Вони сприяють розширенню доступу до мережі, дозволяючи пристроям підключитися до Інтернету незалежно від того, чи вони використовують Wi-Fi або кабельне з'єднання [12].

Розповсюдження сигналу та міркування щодо структури є масовими аспектами для ефективної роботи мережі Wi-Fi. Мережі Wi-Fi, традиційно, забезпечують роботу зв'язку на відстані від 50 до 150 метрів, а у відкритих просторах – до 300 метрів [13]. Вибір частотної функції також впливає на якість сигналу: мережі 802.11b/g працюють у функції 2,4 ГГц, тоді як 802.11a працює на 5 ГГц [14]. Це розрізнення важливе, після 5 ГГц забезпечує вищу швидкість передачі даних, але має обмежену дальність, тоді як 2,4 ГГц має більшу дальність, але можна знати більше перешкод від інших пристроїв, що вимагають цієї функції [15].

Типи мереж Wi-Fi

Персональні мережі (PAN) представляють собою тип мережі, що забезпечує бездротове з'єднання між пристроями на коротких відстанях, зазвичай до 10 метрів [16]. Ця мережа постійно використовується для з'єднання особистих пристроїв, таких як мобільні телефони, ноутбуки та інші гаджети, які потребують швидкого та простого обміну даними. Основною перевагою PAN є зручність, інші користувачі можуть легко підключати та відключати пристрої без необхідності в складних налаштуваннях. У сучасному світі де мобільність є ключовою, такі мережі стали невід'ємною частиною повсюдного життя.

Локальні мережі (LAN) - це колекція пристроїв, об'єднаних разом в одній фізичній локації, наприклад, в офісі або вдома [17]. Цей тип мережі дозволяє

користувачам ділитися ресурсами, такими як принтери, файли та інтернет-з'єднання, що значно підвищує ефективність роботи. LAN використовує технології Wi-Fi, що базуються на стандартах IEEE 802.11, для забезпечення бездротового з'єднання між пристроями [4]. Користувачі можуть отримувати доступ до мережі з будь-якої точки в межах її покриття, що робить LAN зручною для використання в малих і середніх підприємствах, а також у домашніх умовах.

Глобальні мережі (WAN), на відміну від PAN і LAN, охоплюють великі географічні території, з'єднуючи мережі через Інтернет або інші комунікаційні канали [5]. WAN постійно використовує великі організації або підприємства, які мають кількість філій, розташованих на різних континентах. Ці мережі забезпечують зручний доступ до ресурсів і даних з будь-якої точки світу, що є критично важливим для сучасного бізнесу. З технологіями Wi-Fi WAN стають ще більш доступними, дозволяючи з'єднувати віддалені офіси без складних проводів та витрати на фізичну інфраструктуру [18].

Протоколи безпеки Wi-Fi

Повне розуміння протоколів безпеки Wi-Fi має важливе значення для захисту бездротових мереж. Основні протоколи безпеки включають WEP, WPA та WPA2, кожен з яких пропонує різні рівні захисту [19]. WEP (Wired Equivalent Privacy) був одним із перших протоколів безпеки, розроблених для мереж Wi-Fi; однак він має значні вразливості, які дозволяють легко зламати [20]. WPA (Wi-Fi Protected Access) удосконалив WEP, представивши TKIP (протокол цілісності тимчасового ключа), який динамічно змінює ключі та додає надійніше шифрування. Проте WPA все ще має обмеження, що спонукало до розробки WPA2, який використовує AES (Advanced Encryption Standard) для більш надійного шифрування та широко вважається стандартом для безпечних мереж Wi-Fi [4]. Розуміння цих протоколів має вирішальне значення для тих, хто хоче ефективно захистити свій бездротовий зв'язок.

Неможливо переоцінити важливість захисту мереж Wi-Fi, оскільки вони вразливі до різних кіберзагроз, які можуть скомпрометувати конфіденційні дані [21]. Незахищені мережі можуть призвести до несанкціонованого доступу,

дозволяючи хакерам перехоплювати комунікації, викрадати особисту інформацію та навіть запускати атаки на підключені пристрої. Ризики, пов'язані з незахищеними мережами Wi-Fi, включають: - Перехоплення та прослуховування даних - Несанкціонований доступ до мережі - Розповсюдження шкідливих програм - Крадіжка особистих даних Визнання потенційних небезпек підкреслює необхідність надійних заходів безпеки для захисту цілісності мережі та конфіденційності користувачів [22]. Оскільки все більше пристроїв підключаються до мереж Wi-Fi, важливість впровадження надійних протоколів безпеки стає все більш критичною.

Щоб підтримувати безпеку мереж Wi-Fi, слід дотримуватися певних передових практик [23]. Перш за все, регулярне оновлення мікропрограми маршрутизатора може допомогти виправити вразливості та покращити функції безпеки. Крім того, використання надійних унікальних паролів для доступу до мережі є життєво важливим для запобігання неавторизованим користувачам. Впровадження WPA2 або, якщо доступно, WPA3 може додатково посилити безпеку мережі, оскільки ці протоколи пропонують розширені методи шифрування. Інші рекомендовані практики включають: - Включення шифрування мережі - Приховування SSID (ім'я мережі) - Використання гостьової мережі для відвідувачів - Регулярний моніторинг підключених пристроїв Застосовуючи ці найкращі практики, окремі особи та організації можуть значно зменшити ризик порушення безпеки та забезпечити безпечніше онлайн-середовище [19].

Застосування технології Wi-Fi

Технологія Wi-Fi стала важливою складовою як домашнього, так і бізнес-середовища. У домашніх умовах Wi-Fi забезпечує безперебійне підключення кількох пристроїв, дозволяючи користувачам транслювати відео, грати в онлайн-ігри та переглядати Інтернет без клопоту з фізичними кабелями [1]. У бізнес-контексті Wi-Fi полегшує спілкування та співпрацю між співробітниками, оскільки підтримує різні пристрої, включаючи ноутбуки, смартфони та планшети. Використання бездротових локальних мереж (WLAN) дозволяє підприємствам створювати гнучкі робочі простори та підвищувати продуктивність. Крім того,

компанії часто впроваджують захищені мережі Wi-Fi, щоб захистити конфіденційні дані та забезпечити ефективну та безпечну роботу співробітників [24].

Роль Wi-Fi в Інтернеті речей (IoT) є значною, оскільки він служить надійною основою для підключених пристроїв. Технологія Wi-Fi особливо підходить для рішень IoT з інтенсивним об'ємом даних, дозволяючи передавати великі обсяги даних між пристроями без обмежень дротових з'єднань [25]. Наприклад, такі пристрої розумного дому, як термостати, камери безпеки та системи освітлення, покладаються на Wi-Fi для зв'язку між собою та зі смартфонами чи планшетами користувачів [26]. Крім того, шлюзи можуть з'єднувати сенсорні мережі з найближчими мережами Wi-Fi, покращуючи охоплення та функціональність додатків Інтернету речей [27]. Ця інтеграція Wi-Fi з IoT не тільки покращує зручність та ефективність, але й створює можливості для інноваційних застосувань у різних секторах, включаючи охорону здоров'я, сільське господарство та розумні міста.

У громадських місцях все частіше використовують технологію Wi-Fi, щоб забезпечити легкий доступ до Інтернету для користувачів у дорозі. Зараз багато кафе, ресторанів, бібліотек і парків пропонують безкоштовні мережі Wi-Fi, що дозволяє відвідувачам підключати свої пристрої без дротового з'єднання [28]. Однак важливо зазначити, що ці загальнодоступні мережі Wi-Fi часто мають низький рівень безпеки, що робить їх сприйнятливими до злому та витоку даних [29]. Незахищені мережі можуть містити зловмисне програмне забезпечення та віруси, які потенційно заражають підключені пристрої [30]. У зв'язку з цим користувачам рекомендується бути обережними під час доступу до загальнодоступної мережі Wi-Fi, наприклад уникати конфіденційних транзакцій і використовувати віртуальні приватні мережі (VPN) для додаткового рівня безпеки [31]. Цей баланс між зручністю та безпекою є життєво важливим для забезпечення безпечного користування Інтернетом у громадських місцях.

Проблеми та обмеження Wi-Fi

Однією з основних проблем, з якими стикаються мережі Wi-Fi, є перешкоди та проблеми з підключенням [32]. Різні перешкоди, такі як стіни, стелі та меблі, можуть порушити сигнал між пристроями Wi-Fi, що призведе до зниження продуктивності або повного відключення [15]. Крім того, інші пристрої, що працюють на подібних частотах, наприклад пристрої Bluetooth або мікрохвильові печі, можуть створювати невеликі перешкоди, які впливають на роботу мереж Wi-Fi [14]. Як наслідок, користувачі можуть зіткнутися з низькою швидкістю Інтернету, непостійними з'єднаннями або мертвими зонами, де сигнал Wi-Fi слабкий або відсутній. Вирішення цих проблем підключення часто вимагає стратегічного розміщення маршрутизаторів і точок доступу, щоб мінімізувати перешкоди та підвищити загальну продуктивність.

Обмеження діапазону та пропускної здатності викликають серйозне занепокоєння для мереж Wi-Fi [33]. Як правило, Wi-Fi працює в певних діапазонах частот, наприклад 2,4 ГГц і 5 ГГц, що може обмежити відстань, на яку сигнал може ефективно передавати дані. Отже, коли користувачі віддаляються від точки доступу, вони можуть помітити зниження потужності сигналу та швидкості [34]. Крім того, доступна пропускна здатність може стати перевантаженою в середовищах з великою кількістю підключених пристроїв, що призводить до зниження швидкості та збільшення затримки. Це особливо проблематично в густонаселених районах або великих будівлях, де кілька користувачів змагаються за обмежену пропускну здатність. Такі стратегії, як оновлення до нових стандартів Wi-Fi або включення додаткових точок доступу, можуть допомогти пом'якшити деякі з цих обмежень.

Уразливості безпеки є ще однією критичною проблемою, з якою стикаються мережі Wi-Fi [35]. Бездротові мережі за своєю суттю більш сприйнятливі до атак через їх відкриту природу, що дозволяє неавторизованим користувачам перехоплювати передачу даних, якщо не реалізовано відповідні протоколи безпеки [4]. Поширені загрози включають несанкціоновані точки доступу, перехоплення даних і атаки типу "людина посередині", які можуть поставити під загрозу цілісність і конфіденційність конфіденційної інформації [36]. Щоб зменшити ці

ризики, користувачам і мережевим адміністраторам важливо використовувати надійні заходи безпеки, такі як шифрування WPA2 і регулярні оновлення мікропрограми мережі. Крім того, встановлення суворої політики доступу може допомогти гарантувати, що лише авторизованим пристроям дозволено підключатися до мережі Wi-Fi [37].

Майбутні тенденції в технології Wi-Fi

Однією з найважливіших майбутніх тенденцій у технології Wi-Fi є вдосконалення Wi-Fi 6 і вище [13]. Wi-Fi 6, також відомий як 802.11ax, представив ряд удосконалень, спрямованих на підвищення як швидкості, так і ефективності бездротового зв'язку. Ключові особливості цього стандарту включають множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), який забезпечує кращий розподіл смуги пропускання між декількома користувачами, а також покращені можливості багатокористувацького MIMO (MU-MIMO), що забезпечує одночасну передачу даних на декілька пристроїв [38]. Крім того, додавання підтримки діапазону частот 2,4 ГГц у Wi-Fi 6 покращує радіус дії та проникнення сигналу, роблячи його більш надійним у різних середовищах [39]. Оскільки технологія продовжує розвиватися, очікується, що майбутні ітерації Wi-Fi, такі як Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7, забезпечать ще більші покращення продуктивності, задовольняючи зростаючий попит на високошвидкісний доступ до Інтернету.

Роль технології Wi-Fi у контексті мереж 5G і розумних міст стає все більш важливою [40]. Хоча 5G пропонує вищі швидкості та меншу затримку, він працює на ліцензованому спектрі, що може бути обмеженням з точки зору доступності та вартості [40]. Навпаки, Wi-Fi використовує неліцензовані частоти, що робить його більш гнучким рішенням для різних додатків, особливо в густонаселених міських районах. Розумні міста покладаються на безперебійне підключення для своєї інфраструктури, такої як розумні мережі, системи управління дорожнім рухом і мережі громадської безпеки. Мережі Wi-Fi можуть доповнювати 5G, надаючи додаткові можливості підключення для пристроїв і служб, які потребують надійного доступу до Інтернету. Така інтеграція технологій Wi-Fi і 5G є важливою для підвищення ефективності та функціональності екосистем розумного міста.

У найближчі роки нові технології матимуть значний вплив на мережі Wi-Fi [13]. Очікується, що такі інновації, як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання, революціонізують роботу та керування мережами Wi-Fi. У міру поширення пристроїв IoT зростатиме попит на надійні та ефективні мережі Wi-Fi, що потребуватиме розробки розширених інструментів керування мережею, які зможуть працювати з великою кількістю підключених пристроїв. Штучний інтелект і машинне навчання можуть підвищити продуктивність мережі шляхом оптимізації використання пропускної здатності, покращення протоколів безпеки та прогнозування перевантаження мережі. Крім того, прогрес у технології Wi-Fi, такий як Wi-Fi 6E, який працює в діапазоні 6 ГГц, забезпечить більше каналів і зменшить перешкоди, таким чином пристосувавши зростаючу кількість пристроїв і програм, які залежать від бездротового підключення.

1.2. Технології, що застосовуються у Wi-Fi на рівні моделі OSI

Фізичний рівень (Physical Layer)

Методи модуляції:

DSSS (Direct Sequence Spread SpecSRAum) — це технологія модуляції, яка покращує продуктивність локальних бездротових мереж шляхом поширення спектру в більш широкому діапазоні частот [1]. Цей метод мінімізує вплив перешкод і забезпечує більш надійний зв'язок у середовищах із кількома користувачами або потенційними перешкодами [2]. Використовуючи унікальний код розширення для кожної передачі, DSSS гарантує, що навіть якщо частина сигналу втрачена або створена перешкода, вихідні дані все одно можуть бути відновлені в приймачі. Ця надійність і ефективність є вирішальними для підтримки стабільного з'єднання в різних програмах, що робить DSSS однією з основоположних технологій бездротового зв'язку.

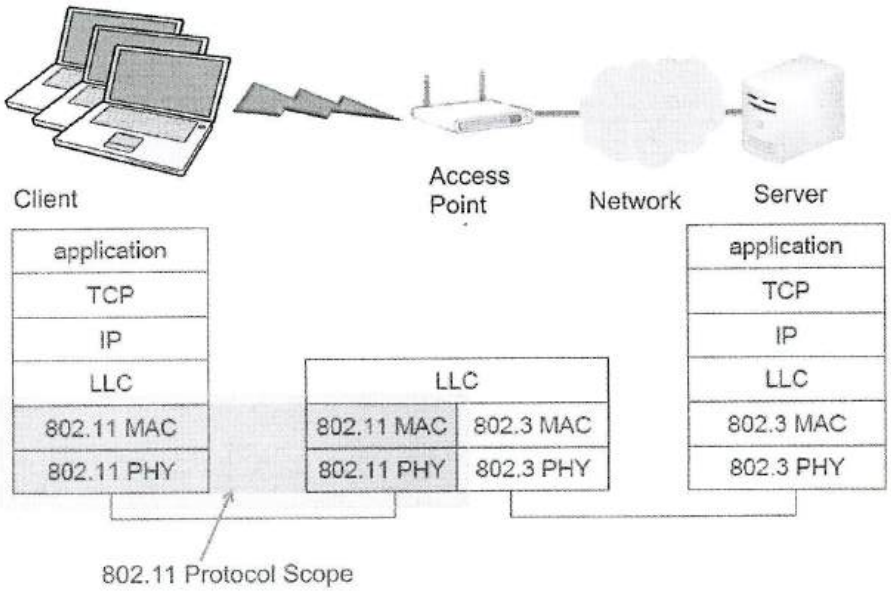


Рис. 1.2. Технології Wi-Fi за рівнями моделі OSI

Ще одним важливим методом модуляції, який використовується в сучасних технологіях Wi-Fi, є OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) і його різновид OFDMA (множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів) [3]. OFDM працює шляхом поділу переданих даних на кілька невеликих пакетів, уможливлюючи передачу бітів одночасно через кілька піднесучих. Цей підхід не тільки збільшує швидкість передачі даних, але й покращує стійкість мережі до багатошляхового завмирання, загальної проблеми в бездротових середовищах [4]. OFDMA йде ще далі, дозволяючи кільком користувачам одночасно використовувати один і той же канал, таким чином оптимізуючи пропускну здатність і покращуючи розподіл ресурсів [5]. Ця можливість особливо корисна в густонаселеному середовищі, наприклад у містах, де багато пристроїв змагаються за обмежену пропускну здатність.

QAM (квадратурна амплітудна модуляція) — це ще один критично важливий метод модуляції, який використовується в Wi-Fi, зокрема з такими досягненнями, як 4096-QAM у Wi-Fi 7 [6]. QAM поєднує як амплітудну, так і фазову модуляцію для більш ефективної передачі даних, значно збільшуючи пропускну здатність даних [7].

Таблиця 1.2.

Технології Wi-Fi за рівнями моделі OSI

Рівень OSI	Технології	Числові характеристики
Фізичний рівень	DSSS, OFDM, OFDMA, QAM до 4096-QAM, частоти: 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz, MIMO, MU-MIMO, Beamforming, ширина каналу до 320 MHz	Швидкість до 46 Gbps, ширина каналу до 320 MHz, модуляція 4096-QAM
Канальний рівень	CSMA/CA, TWT, A-MPDU, A-MSDU, WPA2, WPA3, AES, IEEE 802.11r/k/v	Енергоспоживання оптимізоване (TWT), високий рівень безпеки (AES, WPA3)
Мережевий рівень	Mesh Routing Protocol (IEEE 802.11s), Self-Healing, Self-Organizing Networks, WMM	Підтримка QoS для відео/голосу
Транспортний рівень	TCP/UDP для передачі даних	Швидкість залежить від протоколів: TCP/UDP
Сеансовий рівень	IEEE 802.11e, Wi-Fi Direct	Оптимізація сесій для мультимедіа
Представницький рівень	Технології стиснення даних для відео та аудіо	Стиснення забезпечує оптимальне використання трафіку
Прикладний рівень	VoWi-Fi, Wi-Fi Calling, IoT-додатки	VoWi-Fi: зменшення витрат трафіку на голосові дзвінки

З розвитком технологій Wi-Fi впровадження QAM вищого порядку дозволяє збільшити ємність даних, що призводить до вищої швидкості Інтернету та

покращення загальної продуктивності мережі [8]. Завдяки здатності обробляти більше даних одночасно, 4096-QAM покращує роботу користувача, особливо в сценаріях, що вимагають високої пропускної здатності, наприклад, потокове відео високої чіткості або гра в онлайн-ігри. Цей технологічний прогрес підкреслює постійні інновації в бездротовому зв'язку для задоволення зростаючих потреб користувачів.

Частотні діапазони:

Діапазон частот 2,4 ГГц є одним із найпоширеніших діапазонів для технології Wi-Fi, особливо в старих стандартах, таких як 802.11b і 802.11g [9]. Робота в цьому діапазоні забезпечує більший діапазон підключення, що робить його ідеальним для пристроїв, які можуть бути розташовані далеко від маршрутизатора. Однак ця частота також має свої недоліки, зокрема збільшення перешкод від інших пристроїв, таких як мікрохвильові печі та пристрої Bluetooth, що може призвести до зниження продуктивності. Незважаючи на ці проблеми, діапазон 2,4 ГГц залишається популярним завдяки своїй сумісності з широким спектром пристроїв і здатності ефективно долати стіни та перешкоди. Швидкість передачі даних, досягнута за допомогою технології 2,4 ГГц, може сягати до 600 Мбіт/с за оптимальних умов, яка, хоча й нижча, ніж аналог 5 ГГц, все ще підтримує багато поширених Інтернет-додатків.

Смуга частот 5 ГГц набула популярності з появою нових стандартів Wi-Fi, зокрема 802.11ac і 802.11ax (Wi-Fi 5 і Wi-Fi 6) [10]. Цей діапазон забезпечує більш високу швидкість передачі даних, яка часто перевищує 1 Гбіт/с, що є перевагою для діяльності з високою пропускною здатністю, наприклад потокового передавання та ігор. Хоча 5 ГГц Wi-Fi забезпечує чудову продуктивність і менше перешкод, ніж 2,4 ГГц, його діапазон, як правило, менший через те, що вищі частоти менш ефективні для проникнення через тверді об'єкти. Це обмеження означає, що користувачам може знадобитися забезпечити ближче розташування до своїх маршрутизаторів для оптимальної продуктивності. Діапазон 5 ГГц працює на кількох каналах, що може допомогти зменшити перевантаження в густонаселених районах, що робить його кращим вибором для сучасних бездротових мереж.

Введення діапазону 6 ГГц із Wi-Fi 6E знаменує значний прогрес у бездротових технологіях [11]. Цей частотний діапазон пропонує значні переваги, зокрема збільшену пропускну здатність і зменшену затримку, що може покращити загальну взаємодію з користувачем. Завдяки можливості підтримувати більше одночасних з'єднань діапазон 6 ГГц є особливо корисним у середовищах із великою кількістю пристроїв, таких як розумні будинки та офіси. Оскільки ця частота відносно нова для технології Wi-Fi, вона відчуває менше перешкод порівняно з переповненими діапазонами 2,4 ГГц і 5 ГГц. Потенціал для швидкості передачі даних до 11 Гбіт/с узгоджується зі зростаючим попитом на швидші та надійніші підключення до Інтернету, що задовольняють передові програми, такі як віртуальна реальність і досвід доповненої реальності.

Технології антен:

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) відіграє вирішальну роль у покращенні продуктивності Wi-Fi завдяки використанню кількох передавальних і приймальних антен [12]. Ця система зв'язку дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних, що ефективно збільшує пропускну здатність бездротових з'єднань. Впровадження технології MIMO було трансформаційним, піднявши швидкість каналу бездротового з'єднання з 54 Мбіт/с до значно вищих швидкостей, продемонструвавши її ефективність і здатність покращувати передачу даних [13]. Використовуючи просторове рознесення, яке забезпечується декількома антенами, MIMO також може пом'якшити наслідки багатопроменевої інтерференції, створюючи більш надійний і стійкий досвід бездротового зв'язку.

Спираючись на фундаментальні принципи MIMO, технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO) робить бездротовий зв'язок на крок далі, дозволяючи кільком користувачам підключатися одночасно без погіршення якості послуги [14]. Ця технологія дозволяє маршрутизаторам спілкуватися з декількома пристроями одночасно, значно підвищуючи загальну ефективність мережі. Наприклад, у той час як традиційні маршрутизатори SU-MIMO (Single User MIMO) надсилають дані одному користувачеві за раз, MU-MIMO може підтримувати кілька клієнтів, передаючи потоки даних паралельно, таким чином підвищуючи пропускну

здатність і зменшуючи затримку [15]. Здатність MU-MIMO створювати кілька з'єднань забезпечує краще покриття та покращує роботу користувача, особливо в середовищах із великою кількістю під'єднаних пристроїв [16].

Технологія формування променя є ще одним важливим компонентом, який покращує продуктивність Wi-Fi, спрямовуючи бездротовий сигнал на певні пристрої замість того, щоб транслювати його в усіх напрямках [17]. Формуючи спрямований промінь, маршрутизатори можуть фокусувати свій сигнал на передбачуваному місці розташування клієнтського пристрою, що підвищує силу сигналу та зменшує перешкоди [18]. Існує два типи формування променя: неявне та явне. Явне формування променя вимагає, щоб і маршрутизатор, і клієнт підтримували технологію, забезпечуючи оптимальну продуктивність [19]. Цей цілеспрямований підхід до передачі сигналу не тільки покращує покриття, але й сприяє підвищенню швидкості передачі даних і покращенню стабільності з'єднання, демонструючи його важливість у сучасних системах бездротового зв'язку.

Ширина частотних каналів:

У сфері технологій Wi-Fi ширина частотного каналу 20 МГц і 40 МГц відіграє ключову роль в управлінні пропускною здатністю та оптимізації продуктивності мережі [20]. Використовуючи цю ширину каналу, пристрої Wi-Fi можуть працювати на одному каналі або об'єднувати два канали для підвищення пропускної здатності. Параметр 20 МГц дозволяє конфігурувати вручну, тоді як параметр 20/40 МГц дозволяє автоматично вибирати смугу пропускання на основі поточних умов мережі. Ця гнучкість має вирішальне значення для користувачів у середовищах із різним рівнем перевантаженості мережі, оскільки забезпечує ефективнішу передачу даних і кращий загальний досвід роботи. Можливість адаптивного вибору ширини каналу гарантує, що мережа може вмістити низку додатків, від простого перегляду веб-сторінок до більш інтенсивних дій, таких як потокове відео.

Удосконалення технології Wi-Fi призвело до запровадження ширшої ширини каналів, зокрема із застосуванням каналів 80 МГц і 160 МГц [21]. Ці ширші канали

значно збільшують доступну пропускну здатність, дозволяючи збільшити швидкість передачі даних і покращити продуктивність мережі. Канали 80 МГц можуть бути особливо корисними в щільному середовищі, де кілька пристроїв змагаються за пропускну здатність. Ефективно використовуючи ці канали, мережі Wi-Fi можуть підтримувати потокове відео високої чіткості, онлайн-ігри та інші програми, які потребують великої пропускної здатності, без шкоди для продуктивності. Перехід від вужчих до ширших каналів знаменує суттєву еволюцію можливостей Wi-Fi, дозволяючи користувачам користуватися швидшими та надійнішими з'єднаннями.

Заглядаючи вперед, Wi-Fi 7 збирається зробити революцію в бездротовому з'єднанні завдяки своїй надширокій смузі пропускання каналу до 320 МГц [22]. Це значне розширення не тільки збільшує ємність, але й покращує продуктивність у середовищах із високою щільністю пристроїв. Завдяки таким функціям, як 4096-QAM, Multi-RU і Multi-Link, Wi-Fi 7 має на меті забезпечити швидкість, яка в 4,8 разів перевищує швидкість Wi-Fi 6 і в 13 разів перевищує швидкість Wi-Fi 5 [23]. Цей перехід до надширокаих каналів відкриває захоплюючі можливості як для споживачів, так і для компаній, оскільки він може підтримувати зростаючу кількість підключених пристроїв і програм, яким потрібен високошвидкісний доступ до Інтернету. Оскільки попит на пропускну здатність продовжує зростати, інновації, впроваджені Wi-Fi 7, відіграватимуть важливу роль у формуванні майбутнього бездротового зв'язку.

Канальний рівень (Data Link Layer) Wi-Fi

Механізми доступу до середовища

Одним із основних механізмів доступу до середовища на канальному рівні є множинний доступ із визначенням несучої з уникненням зіткнень (CSMA/CA) [1]. Цей протокол відіграє вирішальну роль в управлінні тим, як пристрої спілкуються через спільне бездротове середовище. Перш ніж пристрій передає дані, він спочатку «прослуховує» канал, щоб переконатися, що жоден інший пристрій наразі не передає, що допомагає уникнути зіткнень [2]. Якщо канал вільний, пристрій надішле свої дані. Цей проактивний підхід не тільки підвищує ефективність

передачі даних, але й мінімізує ризик втрати даних через конфлікти, що робить CSMA/CA необхідним для стабільного та надійного середовища бездротової мережі.

З появою Wi-Fi 6 з'явилася нова функція під назвою Target Wake Time (TWT), яка значно оптимізує споживання енергії в бездротових мережах [3]. TWT дозволяє пристроям планувати певний час для пробудження та зв'язку, замість того, щоб залишатися безперервно активними, що особливо корисно для пристроїв, що живляться від батарей [4]. Скорочуючи час, який пристрої проводять у стані неспання та прослуховування передач, TWT ефективно зменшує загальне енергоспоживання без шкоди для продуктивності. Ця функція сприяє збільшенню терміну служби пристрою та забезпеченню ефективного використання мережевих ресурсів, особливо в середовищах із кількома підключеними пристроями.

Роль механізмів доступу до медіа, таких як CSMA/CA та TWT, неможливо переоцінити в контексті мережевих комунікацій [5]. Ці механізми гарантують, що пристрої можуть ефективно спільно використовувати бездротове середовище, що важливо для підтримки безперебійної передачі даних у мережі. Запобігаючи зіткненням і оптимізуючи використання енергії, ці протоколи сприяють більш надійній і ефективній мережевій інфраструктурі. Крім того, вони допомагають керувати складнощами зростаючої кількості підключених пристроїв, тим самим забезпечуючи ефективне масштабування мереж, зберігаючи високу продуктивність і низьку затримку при передачі даних [6].

Фрагментація та агрегація пакетів

A-MPDU, або агрегований блок даних протоколу MAC, є ключовим компонентом канального рівня, який підвищує ефективність передачі даних у мережах Wi-Fi [7]. Цей метод дозволяє об'єднувати кілька блоків даних протоколу MAC (MPDU) в один кадр для передачі. Завдяки цьому A-MPDU зменшує накладні витрати, пов'язані з надсиланням окремих кадрів, що може призвести до покращення пропускної здатності та зменшення затримки [8]. Агрегація кадрів дозволяє краще використовувати доступну смугу пропускання, що робить його особливо корисним у середовищах із високими вимогами до трафіку. Завдяки

реалізації A-MPDU пристрої можуть надсилати більше даних одночасно, таким чином оптимізуючи загальну продуктивність мережі.

З іншого боку, A-MSDU, або агрегований блок даних служби MAC, відіграє додаткову роль на рівні каналу даних, уможливлюючи агрегацію кількох блоків даних служби MAC в одному кадрі [7]. Кожен A-MSDU може нести корисне навантаження, яке включає кілька MSDU, що допомагає мінімізувати накладні кадри та підвищує ефективність передачі даних. Це агрегування є особливо ефективним у сценаріях, коли потрібно передати менші пакети, оскільки воно поєднує їх в єдиний блок, таким чином зменшуючи кількість необхідних окремих передач [9]. Використовуючи A-MSDU, мережі можуть додатково оптимізувати свою пропускну здатність і продуктивність, особливо в програмах, які потребують високої швидкості передачі даних і низької затримки.

Ролі фрагментації та агрегації пакетів є життєво важливими для забезпечення ефективної передачі даних у мережах Wi-Fi [8]. Фрагментація дозволяє розділити великі пакети на менші сегменти, які можна більш надійно передавати через мережу. Це особливо важливо в середовищах, де якість сигналу може відрізнятися, оскільки менші пакети з меншою ймовірністю стикаються з помилками передачі. І навпаки, агрегація об'єднує кілька пакетів в одну передачу, що мінімізує накладні витрати та максимізує пропускну здатність [5]. Разом ці методи підвищують продуктивність канального рівня, забезпечуючи надійну та ефективну доставку даних між пристроями, підключеними в одному сегменті мережі, що в кінцевому підсумку покращує роботу користувача та надійність мережі.

Шифрування та безпека

WPA2 і WPA3 є основними протоколами безпеки, розробленими Wi-Fi Alliance для захисту бездротових мереж від несанкціонованого доступу та атак [10]. WPA2, який замінив застарілий протокол WEP, представив більш безпечний метод шифрування та автентифікації для бездротових з'єднань [11]. Однак WPA3 пішла на крок далі в безпеці, надаючи розширені механізми автентифікації та вдосконалені стандарти шифрування [12]. Однією з ключових особливостей WPA3 є його здатність пропонувати кращий захист від атак грубої сили, що робить його

більш надійним вибором для захисту бездротового зв'язку, особливо в середовищах, де передаються конфіденційні дані.

Розширений стандарт шифрування (AES) відіграє вирішальну роль у захисті даних, що передаються через мережі Wi-Fi [13]. Цей симетричний алгоритм блокового шифрування, який працює з розміром блоку 128 біт і довжиною ключа 128, 192 або 256 біт, забезпечує високий рівень безпеки бездротового зв'язку [14]. AES був розроблений як заміна застарілого DES (стандарт шифрування даних) і став кращим методом шифрування для різних програм, включаючи протоколи Wi-Fi, такі як WPA2 і WPA3 [15]. Впровадження AES гарантує, що навіть якщо дані перехоплюються під час передачі, вони залишаються захищеними від несанкціонованого доступу, таким чином зберігаючи конфіденційність і цілісність інформації.

Роль шифрування в безпеці Wi-Fi неможливо переоцінити, оскільки воно має фундаментальне значення для захисту даних, що передаються через бездротові мережі [16]. Шифрування діє як бар'єр проти прослуховування та витоку даних, забезпечуючи безпеку конфіденційної інформації, такої як особисті дані та фінансові операції [10]. Крім того, ефективні протоколи шифрування, такі як WPA2 і WPA3, сприяють комплексній системі безпеки, яка включає автентифікацію та перевірку цілісності, ще більше зміцнюючи безпеку мережі [17]. Оскільки бездротові технології продовжують розвиватися, важливість надійних засобів шифрування залишається першорядною для захисту даних користувачів і підвищення загальної безпеки мережі.

Роумінг у Wi-Fi

IEEE 802.11r є критично важливим стандартом, який забезпечує швидкий роумінг у мережах Wi-Fi [18]. Цей стандарт дозволяє бездротовим пристроям автоматично переходити між точками доступу з мінімальними перешкодами, значно покращуючи роботу користувача, особливо в таких сценаріях, як голосові виклики через Wi-Fi (VoWiFi). Зменшуючи час роумінгу до 100 мілісекунд, цей стандарт гарантує, що користувачі залишаються на зв'язку навіть під час переміщення між різними зонами покриття [19]. Швидкий роумінг важливий у

середовищах, де потрібне безперервне з'єднання, наприклад, у медичних установах або завантажених офісних приміщеннях, де перерви можуть призвести до зниження продуктивності та задоволеності користувачів.

На додаток до IEEE 802.11r, стандарти IEEE 802.11k і IEEE 802.11v відіграють вирішальну роль в оптимізації процесу роумінгу [20]. Стандарт IEEE 802.11k допомагає пристроям швидко визначати найближчі доступні точки доступу, створюючи оптимізований список каналів [21]. Цей проактивний підхід дозволяє пристроям приймати обґрунтовані рішення про те, до яких точок доступу підключатися, тим самим покращуючи загальну ефективність мережі. Водночас IEEE 802.11v допомагає краще керувати мережевими ресурсами, дозволяючи пристроям отримувати інформацію про стан і продуктивність мережі, що може допомогти їм вибрати найкращу точку доступу під час процесу роумінгу.

Неможливо переоцінити роль роумінгу в мережах Wi-Fi, оскільки він безпосередньо впливає на ефективність і зручність використання бездротових з'єднань [22]. Роумінг гарантує, що пристрої підтримують стабільне з'єднання, поки користувачі пересуваються в середовищі, що особливо важливо в умовах, де мобільність є частою. Крім того, ефективні механізми роумінгу сприяють: - Покращена взаємодія з користувачем завдяки безперебійному з'єднанню - Ефективне використання ресурсів мережі — Покращена загальна продуктивність і надійність бездротових мереж Завдяки впровадженню передових стандартів, таких як IEEE 802.11r, 802.11k і 802.11v, мережі Wi-Fi можуть забезпечити можливості безперебійного роумінгу, які відповідають вимогам сучасних користувачів, забезпечуючи постійне та надійне підключення.

1.3. Особливості частотного розподілу в Wi-Fi мережах

Визначення та важливість розподілу частот у мережах Wi-Fi

Розподіл частоти в мережах Wi-Fi є критичним для забезпечення ефективної передачі даних. Він визначає, на частотах яких працюють бездротові пристрої,

зазвичай в режимах 2,4 ГГц і 5 ГГц. Ці частоти використовують для передачі інформації через радіохвилі, які можуть знати вплив інших пристроїв, які працюють у цій же зоні [1]. Розуміння розподілу частоти дозволяє оптимізувати налаштування мережі, зменшуючи перешкоди та підвищуючи якість з'єднання. Наприклад, використання частоти 5 ГГц може забезпечити вищу швидкість передачі даних, в кінці цієї області менш насичений, ніж 2,4 ГГц, що робить його кращим вибором для сучасних бездротових мереж [2].

Розподіл частот також змінює важливу роль у загальній продуктивності мережі Wi-Fi. Коли користувачі підключають свої пристрої до бездротової мережі, вони повинні отримати, які частоти підтримують маршрутизатор. Вибір маршрутизатора з відповідним стандартом і частотним компонентом може значно вплинути на швидкість і стабільність з'єднання [3]. Наприклад, маршрутизатори, що підтримують технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), можуть одночасно передавати кілька потоків даних, що забезпечує загальну продуктивність мережі [4]. Таким чином, правильний вибір частотної функції може істотно підвищити якість обслуговування користувачів в мережах Wi-Fi.

Вплив розподілу частот на передачу даних у мережах Wi-Fi є суттєвим аспектом, який варто втратити. Частотний розділ не тільки досягає максимальної швидкості передачі даних, але й впливає на покриття та дальність сигналу [5]. Наприклад, хвилі з частотою 2,4 ГГц мають більшу здатність проникати через перешкоди, такі як стіни, але часто знають більший вплив від заваджень [1]. У той же час частота 5 ГГц може забезпечити вищу швидкість передачі даних, але з меншим радіусом дії [2]. Таким чином, оптимальний вибір частотного деформування значно знижує ефективність передачі даних у бездротових мережах, забезпечуючи надійне з'єднання для користувачів.

Типи діапазонів частот, що використовуються в мережах Wi-Fi

Діапазон частот 2,4 ГГц є одним із найстаріших і найбільш широко використовуваних для мереж Wi-Fi, пропонуючи значні характеристики, які задовольняють різні потреби користувачів [6].

Таблиця 1.3.

Характеристики частотного розподілу в Wi-Fi мережах

Пункт плану	Числові показники	Приклади значень
1. Основи частотного спектра Wi-Fi	Частоти: 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz. Кількість каналів: 14 (2.4 GHz), 25-45 (5 GHz), 59 (6 GHz)	2.4 GHz: 2412–2484 MHz; 5 GHz: 5180–5825 MHz; 6 GHz: 5925–7125 MHz
2. Характеристики частотних діапазонів Wi-Fi	Швидкість передачі: до 11 Mbps (2.4 GHz), до 3.5 Gbps (5 GHz), до 9.6 Gbps (6 GHz)	Швидкість: 11 Mbps (802.11b), 54 Mbps (802.11g/a), 9.6 Gbps (Wi-Fi 6E)
3. Розподіл каналів у Wi-Fi мережах	Неперекриваючі канали: 3 (2.4 GHz), до 24 (5 GHz), 59 (6 GHz)	Ширина каналу: 20 MHz (2.4 GHz), 40/80 MHz (5 GHz), 160 MHz (6 GHz)
4. Проблеми частотного розподілу в Wi-Fi	Щільність мереж: >50 пристроїв/канал у густонаселених районах	Втрата сигналу на відстані: до 60% для 5 GHz
5. Оптимізація частотного використання в Wi-Fi мережах	Оптимізація: DFS для 60% каналів у 5 GHz, зменшення перешкод до 30%	Використання каналів: <50% для низького трафіку

Однією з головних переваг цього діапазону є його більша зона покриття, що дозволяє поширювати сигнали на відстані до 150 метрів від точки доступу [7]. Це робить його ідеальним вибором для середовищ, де потрібне широке покриття, наприклад для великих будинків або відкритих просторів. Однак діапазон 2,4 ГГц також має свої недоліки, насамперед через обмежену кількість каналів, доступних для передачі. Маючи лише три канали, ризик перешкод сигналу підвищується, особливо в густонаселених районах, де співіснують кілька мереж Wi-Fi [8].

Відповідно, користувачі можуть відчути зниження продуктивності з точки зору швидкості, яка обмежена 450 Мбіт/с або 600 Мбіт/с за ідеальних умов, залежно від характеристик маршрутизатора [9].

На відміну від цього, смуга частот 5 ГГц пропонує відмінні характеристики, які можуть значно підвищити продуктивність Wi-Fi, зокрема з точки зору швидкості та швидкості передачі даних [8]. Цей діапазон забезпечує вищу швидкість передачі даних із можливостями, що досягають 1733 Мбіт/с при використанні передових методів модуляції, таких як 256-QAM [3]. Однак діапазон 5 ГГц має компроміс: він має меншу зону покриття порівняно з діапазоном 2,4 ГГц, що робить його менш ефективним при проникненні через стіни та тверді предмети [10]. Це обмеження означає, що користувачам може знадобитися стратегічне розташування своїх маршрутизаторів для оптимізації продуктивності в різних налаштуваннях. Незважаючи на менший діапазон, діапазон 5 ГГц має більшу кількість доступних каналів, що допомагає зменшити перешкоди та забезпечує більш стабільне підключення до Інтернету [7]. Як наслідок, він особливо добре підходить для додатків із високою пропускною здатністю, таких як онлайн-ігри та потокове передавання.

З розвитком технології Wi-Fi з'являються нові діапазони частот, щоб усунути обмеження існуючих діапазонів. Введення діапазону 6 ГГц є значним прогресом, пропонуючи додатковий спектр до 1200 МГц, який можна використовувати для мереж Wi-Fi [11]. Ця нова смуга призначена для підвищення ефективності пропускної здатності та зменшення перевантаження в переповнених діапазонах нижчих частот [12]. Примітно, що майбутній стандарт Wi-Fi 7 підтримуватиме з'єднання в трьох діапазонах частот: 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц завдяки таким функціям, як Multi-Link Operation (MLO), які ефективніше розподіляють з'єднання [13]. Ця інновація обіцяє покращити загальну продуктивність мережі, забезпечуючи більш надійні та гнучкі з'єднання в різноманітних середовищах, що робить її захоплюючим досягненням в еволюції бездротового зв'язку.

Основи частотного спектра Wi-Fi

Стандарти IEEE 802.11 відіграють вирішальну роль у визначенні частотних діапазонів, що використовуються для мереж Wi-Fi, причому найбільш помітними є діапазони 2,4 ГГц і 5 ГГц [14]. Стандарт 802.11b працює переважно в діапазоні 2,4 ГГц, який добре відомий своєю більшою зоною покриття, але обмеженою швидкістю передачі даних, що досягає 11 Мбіт/с [15]. Навпаки, стандарт 802.11a використовує частоту 5 ГГц і пропонує значно вищу швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с [6]. Крім того, запровадження нових стандартів, таких як 802.11n, призвело до розробки дводіапазонних маршрутизаторів, які можуть використовувати обидва частотні діапазони, ефективно підвищуючи універсальність мережі та продуктивність [5]. Ця різноманітність стандартів і параметрів частоти дозволяє користувачам вибрати найбільш підходящу конфігурацію на основі їхніх конкретних потреб і середовища.

Співвідношення між частотою та шириною каналу є критичним аспектом продуктивності Wi-Fi [16]. Наприклад, у діапазоні 5 ГГц ширину каналу можна збільшити до 80 МГц, що призводить до значного підвищення швидкості передачі даних порівняно з діапазоном 2,4 ГГц, де ширина каналу зазвичай обмежена 20 МГц [7]. Хоча діапазон 5 ГГц забезпечує вищу швидкість передачі даних завдяки ширшим каналам, він також має компроміс меншої зони покриття [8]. Це означає, що в середовищах, де потрібен потужний сигнал на більшій території, наприклад, у будинках або офісах, діапазон 2,4 ГГц може бути кращим, незважаючи на нижчу швидкість. Розуміння цієї динаміки дозволяє користувачам оптимізувати свої мережі Wi-Fi як щодо швидкості, так і щодо покриття на основі їхніх унікальних обставин.

Правила використання частотного спектру суттєво відрізняються в різних країнах, що впливає на доступні канали для мереж Wi-Fi [1]. У багатьох регіонах діапазон 2,4 ГГц є повсюдно доступним для неліцензійного використання, але точні частоти та обмеження потужності можуть відрізнятися [17]. Наприклад, хоча діапазон 5 ГГц також широко використовується, деякі країни накладають обмеження на певні канали, щоб мінімізувати перешкоди радіолокаційним системам та іншим критичним комунікаціям [1]. Ці нормативні відмінності

означають, що користувачі повинні знати місцеві правила під час налаштування своїх мереж Wi-Fi, щоб забезпечити відповідність і оптимальну продуктивність. Крім того, запровадження Wi-Fi 6E, який працює в нещодавно виділеному діапазоні 6 ГГц, обіцяє запропонувати додаткові канали та зменшити перешкоди, ще більше розширивши можливості мереж Wi-Fi у регіонах, де це дозволено [18].

Характеристики частотних діапазонів Wi-Fi

Смуга частот 2,4 ГГц широко відома своїми перевагами та недоліками в мережах Wi-Fi [19]. Ключовою перевагою цього діапазону є його більша зона покриття, що дозволяє поширювати сигнал на великі відстані та краще проникати крізь стіни та тверді предмети [20]. Ця можливість робить діапазон 2,4 ГГц ідеальним для підключення різноманітних пристроїв, оскільки майже всі гаджети сумісні з цією частотою [8]. Однак недоліком використання діапазону 2,4 ГГц є загалом нижча якість сигналу порівняно з діапазонами вищих частот, що призводить до потенційних проблем із підключенням у перевантажених середовищах. Крім того, діапазон часто переповнений, оскільки багато пристроїв використовують однакові частоти, що може призвести до перешкод і зниження продуктивності [21].

На відміну від цього, діапазон частот 5 ГГц має власний набір унікальних характеристик, які впливають на його продуктивність у мережах Wi-Fi [8]. Однією з головних переваг діапазону 5 ГГц є наявність більш вільних каналів для передачі сигналу, що сприяє вищій швидкості Інтернету [8]. Однак ця підвищена швидкість коштує дорого, оскільки зона покриття менша порівняно з діапазоном 2,4 ГГц, що робить його менш ефективним для великих просторів [7]. Крім того, короткі хвилі діапазону 5 ГГц менш здатні проникати через стіни та тверді предмети, що може перешкоджати його ефективності в певних середовищах [22]. Незважаючи на ці проблеми, покращена швидкість передачі даних робить діапазон 5 ГГц кращим вибором для додатків із високою пропускною здатністю, таких як потокове передавання та ігри.

Введення діапазону 6 ГГц, зокрема зі стандартом Wi-Fi 6E, знаменує значний прогрес у бездротовому з'єднанні [23]. Цей новий частотний діапазон пропонує

вражаючі 480 МГц додаткового спектру, що може значно збільшити пропускну здатність мережі та підвищити загальну продуктивність [24]. Завдяки потенціалу підтримки швидкості передачі даних до 5 Гбіт/с, Wi-Fi 6E є особливо корисним для корпоративних і публічних бездротових мереж [25]. Незважаючи на те, що Wi-Fi 6E побудовано на тій самій технології 802.11ax, що й Wi-Fi 6, він забезпечує істотну інновацію, використовуючи незначно завантажений діапазон частот 6 ГГц, зменшуючи перевантаження в нижніх діапазонах [3]. З розвитком мереж Wi-Fi діапазон 6 ГГц відкриває захоплюючі можливості для покращення зв'язку та задоволення вимог додатків, що потребують дедалі більшої кількості даних.

Розподіл каналів у Wi-Fi мережах

Канали в діапазоні 2,4 ГГц часто виникають з проблемами перекриття, що може негативно вплинути на продуктивність Wi-Fi мережі [26]. В цій частині існує лише три неперекриваючих канали (1, 6 і 11), остання ширина кожного каналу становить 20 МГц, а сусідні канали перекриваються на 3 МГц [27]. Це означає, що при використанні більш ніж трьох точок доступу в одній зоні можуть виникати інтерференції, що призводить до зниження швидкості передачі даних і збільшення затримок. Оскільки 2,4 ГГц забезпечує більшу зону покриття, але за рахунок меншої пропускної здатності, важливо розуміти, як правильно налаштувати канали для уникнення проблем з перекриттям.

На відміну від 2,4 ГГц, діапазон 5 ГГц пропонує значно більше каналів, які не перекриваються, що робить його більш привабливим для сучасних мереж Wi-Fi [28]. У цій частині доступно до 19 каналів, що дозволяє зменшити ймовірність інтерференцій та підвищити продуктивність мережі [7]. Звичайно, 5 ГГц забезпечує меншу зону покриття порівняно з 2,4 ГГц, але компенсує це більшою швидкістю передачі даних [7]. Це особливо важливо для середовищ з високими вимогами до швидкості, таких як офіси або домогосподарства з багатьма пристроями, де потреба в швидкому з'єднанні є критичною.

Вибір оптимального каналу для мережі Wi-Fi є аспектом забезпечення стабільності та продуктивності з'єднання [29]. Існують різні механізми, які допомагають автоматично вибрати найменші завантажені канали, що дозволяє

зменшити інтерференцію [30]. Наприклад, деякі маршрутизатори використовують технологію автоматичного підбору каналу, яка аналізує навколишнє середовище та вибирає найбільш підходящий канал для підключення [31]. Це дозволяє користувачам максимально використовувати доступні ресурси та підвищує загальну продуктивність мережі, що є місцем для стабільного та швидкого з'єднання Wi-Fi.

Проблеми частотного розподілу в Wi-Fi

Однією з важливих проблем, що впливають на розподіл частот у мережах Wi-Fi, є перешкоди від суміжних пристроїв [32]. Wi-Fi працює на певних каналах, з інтервалом між ними всього 5 МГц. Така близькість означає, що коли один пристрій використовує канал, це може створювати сильні перешкоди для сусідніх каналів. Наприклад, якщо маршрутизатор працює на шостому каналі, перешкоди на каналах 5 і 7 будуть суттєвими, тоді як на каналах 4 і 8 перешкоди будуть меншими [33]. Це явище може призвести до зниження продуктивності пристроїв, які намагаються спілкуватися через ці канали, що призведе до зниження швидкості та збільшення затримки. Такі перешкоди підкреслюють потребу в ефективному управлінні каналами та плануванні для оптимізації продуктивності в переповненому середовищі.

Співіснування Wi-Fi з іншими бездротовими технологіями, такими як Bluetooth і Zigbee, створює ще одну проблему для розподілу частот [34]. Працюючи переважно в діапазоні 2,4 ГГц, ці технології часто конкурують за однакові частотні ресурси, що призводить до потенційних перешкод сигналу та погіршення продуктивності. Оскільки різні пристрої намагаються підключитися одночасно, ймовірність перекриття зростає, що ускладнює керування доступною смугою пропускання. Дослідження показали, що взаємодія між цими технологіями може створювати додаткові перешкоди, особливо коли щільність таких пристроїв у певній області зростає [35]. Ця ситуація потребує ретельного планування, щоб забезпечити ефективне функціонування багатьох технологій, не завдаючи значних збоїв одна одній.

Щільність мереж Wi-Fi може значно вплинути на доступність і ефективність частотних ресурсів [36]. У регіонах, де численні мережі Wi-Fi працюють поблизу, конкуренція за обмежені канали стає помітною. Така висока щільність може призвести до перевантаження та неефективності, оскільки різні мережі змагаються за пропускну здатність. Отже, ефективне використання частотних ресурсів стає дедалі складнішим. Адміністратори мережі повинні враховувати такі фактори, як вибір каналу, потужність передачі та географічне розташування пристроїв, щоб пом'якшити наслідки переповненості. Використовуючи стратегії керування щільністю мережі та розподілом частот, можна підвищити загальну продуктивність і надійність підключень Wi-Fi у густонаселених середовищах.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ

2.1. Роль маршрутизації у підвищенні продуктивності Wi-Fi мереж

Оптимізація маршруту передачі даних

Вибір оптимального маршруту є критичним кроком етапом оптимізації маршруту передачі даних у мережах Wi-Fi [1]. Алгоритми маршрутизації виконують ключову роль у визначеному найкоротшому або найменшому завантаженому маршруті для передачі інформації, що дозволяє мінімізувати затримки та уникати вузькі місця в мережі [2]. Наприклад, використання алгоритмів, таких як DijksSRAa або Bellman-Ford, дозволяє маршрутизаторам швидко аналізувати доступні маршрути та вибирати найбільш ефективні. Це особливо важливо в умовах високого трафіку, коли затримки можуть значно вплинути на якість обслуговування, що, у своєму випадку, може призвести до зниження продуктивності в усій мережі.

Балансування навантаження є ще одним аспектом, що сприяє підвищенню продуктивності Wi-Fi мережі [3]. Сучасні протоколи маршрутизації, такі як OLSR (Optimized Link State Routing) і AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), дозволяють рівномірно розподіляти завантаження між усіма вузлами мережі. Це запобігає перевантаженню окремих точок доступу, що може призвести до зниження швидкості передачі даних та зменшення якості з'єднання [4]. Розподіл навантаження гарантує збереження стабільності мережі, забезпечуючи більш рівномірне використання ресурсів, що, у свою чергу, забезпечує загальну ефективність мережі.

Адаптивність маршрутизації є ще одним із багатьох чинників, що впливає на продуктивність мережі Wi-Fi [5]. Динамічна маршрутизація здатна реагувати на зміни в мережі, так як збільшити трафік або відмова вузла, що забезпечує стабільну продуктивність навіть у складних умовах.

Таблиця 2.1.

Роль методів маршрутизації в оптимізації продуктивності Wi-Fi мереж

Параметр	Характеристика	Протоколи та алгоритми
Оптимізація маршруту передачі даних	Застосування алгоритмів, як-от DijksSRAa чи Bellman-Ford, для вибору найефективнішого маршруту.	DijksSRAa, Bellman-Ford
Балансування навантаження	Рівномірний розподіл трафіку за допомогою протоколів, таких як OLSR і AODV.	OLSR, AODV
Адаптивність маршрутизації	Динамічне реагування на зміни в мережі, що забезпечує стабільність у складних умовах.	OSPF, RIP
Підвищення надійності та доступності	Створення резервних маршрутів для автоматичного перенаправлення трафіку під час збоїв.	RIP, OSPF
Ефективне використання частотного ресурсу	Мінімізація колізій і інтерференції для підвищення швидкості передачі даних.	CSMA/CA
Оптимізація роботи в багатоканальних Wi-Fi мережах	Динамічне управління маршрутами для зменшення затримок і покращення продуктивності.	OLSR, DSR
Впровадження сучасних технологій маршрутизації	Забезпечення QoS та інтеграція з IoT для оптимізації передачі даних.	QoS, MQTT

Це особливо актуально в умовах, коли мережа піддається частиним змінам, наприклад, при більшій кількості користувачів або при підключенні нових

пристроїв [6]. Динамічні алгоритми маршрутизації можуть автоматично досягатися, щоб знайти оптимальні маршрути в реальному часі, що дозволяє підтримувати високу швидкість передачі даних та якість з'єднання.

Підвищення надійності та доступності

Резервування маршрутів є критичним аспектом у багатовузлових мережах Wi-Fi, таких як MESH-мережі [7]. Маршрутизація дозволяє створювати альтернативні маршрути, які дають змогу обійти несправності або перешкоди в мережі. Це забезпечує більшу надійність, якщо один із вузлів вийде з ладу, трафік може бути швидко перенаправлений через інші доступні маршрути. Наприклад, у ситуаціях, коли один із маршрутизаторів не працює, дані можуть бути автоматично перенаправлені до найближчого активного вузла, що запобігає перерві в обслуговуванні. Завдяки цьому користувачі підтримують стабільне з'єднання, навіть у випадках технічних несправностей в мережі.

Ще важливою функцією протоколів маршрутизації є здатність швидко відновлювати зв'язок у випадку втрати з'єднання з одним з вузлів [7]. Це забезпечує безперервність обслуговування, що є критичним для користувачів, які знаходяться на стабільних мережевих з'єднаннях для роботи або розваг. Коли протокол маршрутизації виявляється, що один із маршрутів недоступний, він автоматично перенаправляє трафік через альтернативні шляхи, що дозволяє уникнути затримок і збоїв при передачі даних. Цей механізм не тільки забезпечує надійність мережі, але також забезпечує її ефективність у використанні, знижує ймовірність втрати даних під час передачі.

Підвищення надійності та доступності мережі Wi-Fi є завданням для забезпечення якісного обслуговування користувачів [7]. З використанням сучасних протоколів маршрутизації, таких як RIP чи OSPF, мережі можуть адаптуватися до змінених умов та вимог трафіку. Це включає в себе можливість управління завантаженням, що дозволяє оптимізувати маршрути для зменшення затримок і покращення використання ресурсів. Такі функції не тільки покращують загальну продуктивність мережі, але й забезпечують користувачам кращий досвід, особливо в умовах високої навантаженості або несправностей у мережі. У результаті

надійний і доступний Wi-Fi стає критичним місцем у сучасному світі, де безперервне підключення є обов'язковим.

Ефективне використання частотного ресурсу

Зменшення колізій є критичним аспектом у маршрутизації мережі Wi-Fi, що забезпечує оптимальний розподіл трафіку для уникати перекачування певних частотних каналів [1]. Коли пристрої, що працюють в одній частині, налаштовані на перекриваючі канали, це може призвести до суттєвих втрат швидкості через колізії сигналів [8]. Важливою стратегією є використання ненакладних каналів, що дозволяє зменшити ймовірність зіткнень між даними, які передаються всіма пристроями. Це не тільки швидкість передачі даних, але і підвищує загальну продуктивність мережі, що є необхідним для задоволення потреб користувачів.

Мінімізація інтерференції є ще одним із аспектів ефективного використання частотного ресурсу в мережах Wi-Fi [9]. Вибір маршрутів, які проходять по висоті з високим рівнем інтерференції, дозволяє зберегти якість сигналу та швидкість передачі даних [1]. Інтерференція може виникати з різних джерел, таких як інші бездротові мережі, електронні пристрої або фізичні пошкодження. Уникнення таких зон шляхом адаптації маршрутів забезпечує надійніше з'єднання, що є особливо зручним у середовищі з великою щільністю користувачів. Це дозволяє зберегти стабільність і швидкість мережі, що, у вашому часі, задоволено користувачами.

Ефективне використання частотного ресурсу помилки на загальну продуктивність мережі Wi-Fi [10]. Застосування методів маршрутизації, які враховують наявність доступних частот і рівня навантаження, дозволяє оптимізувати трафік та підвищити швидкість передачі даних [1]. Наприклад, маршрутизація може використовувати дані про завантаженість каналів для визначення найкращих маршрутів, що зменшує ймовірність перевантажень. Оптимізація налаштувань маршрутизатора також покращує продуктивність, оскільки правильна конфігурація може зменшити затримки та покращити якість з'єднання [1]. Це загалом призводить до більш ефективного використання наявних частотних ресурсів, забезпечуючи високу продуктивність мережі Wi-Fi.

Оптимізація роботи в багатоканальних Wi-Fi мережах

У багатоканальних Wi-Fi мережах маршрутизація успішної ключової ролі при забезпеченні ефективного використання доступних каналів. Вибираючи маршрути, які включають найменше завантажених або найкращих за якістю каналів, система може зменшити затримки та підвищити швидкість передачі даних [1]. Це особливо важливо в умовах зростання кількості елементів, які підключаються до мережі, відсутність конкуренції за пропускну здатність може призвести до зниження продуктивності. Завдяки динамічному управлінню маршрутизацією мережа може адаптуватися до змінених умов, вибираючи оптимальні канали в реальному часі, що дозволяє зменшити затримки та підвищити загальну продуктивність мережі.

Крім того, маршрутизація підтримує адаптивну передачу даних кіл між каналами, що забезпечує загальну пропускну здатність мережі [5]. Це досягається шляхом розподілу трафіку серед доступних каналів, що дозволяє уникнути перезавантаження одного каналу. Наприклад, у мережах, які використовують як канали 2,4 ГГц, так і 5 ГГц, маршрутизація може автоматично перенаправляти трафік на менш завантажений канал відповідно до поточного стану мережі [11]. Це забезпечує стабільність і швидкість передачі даних, що особливо важливо для завдань, які вимагають високої пропускної здатності, таких як потокове відео чи онлайн-ігри.

Оптимізація роботи в багатоканальних мережах Wi-Fi є критично важливим завданням для забезпечення безперебійного з'єднання та високої швидкості передачі даних [1]. Вона включає правильну конфігурацію маршрутизаторів, що дозволяє максимально використовувати всю доступну ширину смуги. одночасно, налаштування потужності передавача та вибору оптимальних каналів для кожного з'єднання можуть значно вплинути на загальну продуктивність мережі [12]. Крім того, моніторинг стану мережі та адаптація маршрутизації в реальному часі можуть допомогти зменшити втручання від інших пристроїв, які підключаються, і, таким чином, підвищити якість зв'язку для всіх користувачів.

Впровадження сучасних технологій маршрутизації

Якість обслуговування (QoS) є фундаментальним аспектом сучасних протоколів маршрутизації, який покращує продуктивність мереж Wi-Fi, дозволяючи пріоритезацію трафіку для критично важливих програм, таких як голос і відео [13]. Ці програми часто вимагають мінімальної затримки та високого рівня обслуговування для ефективної роботи, що робить важливим для протоколів маршрутизації ефективне керування розподілом смуги пропускання. Впроваджуючи заходи QoS, мережі можуть гарантувати, що чутливі до часу пакети даних отримають пріоритет над менш критичним трафіком. Така пріоритезація покращує роботу користувачів, особливо в періоди високого попиту, коли пропускна здатність може бути обмежена. Приклади механізмів QoS включають методи формування трафіку та пріоритезації, які динамічно розподіляють ресурси на основі поточних умов мережі, що зрештою призводить до більш надійної та ефективної роботи мережі.

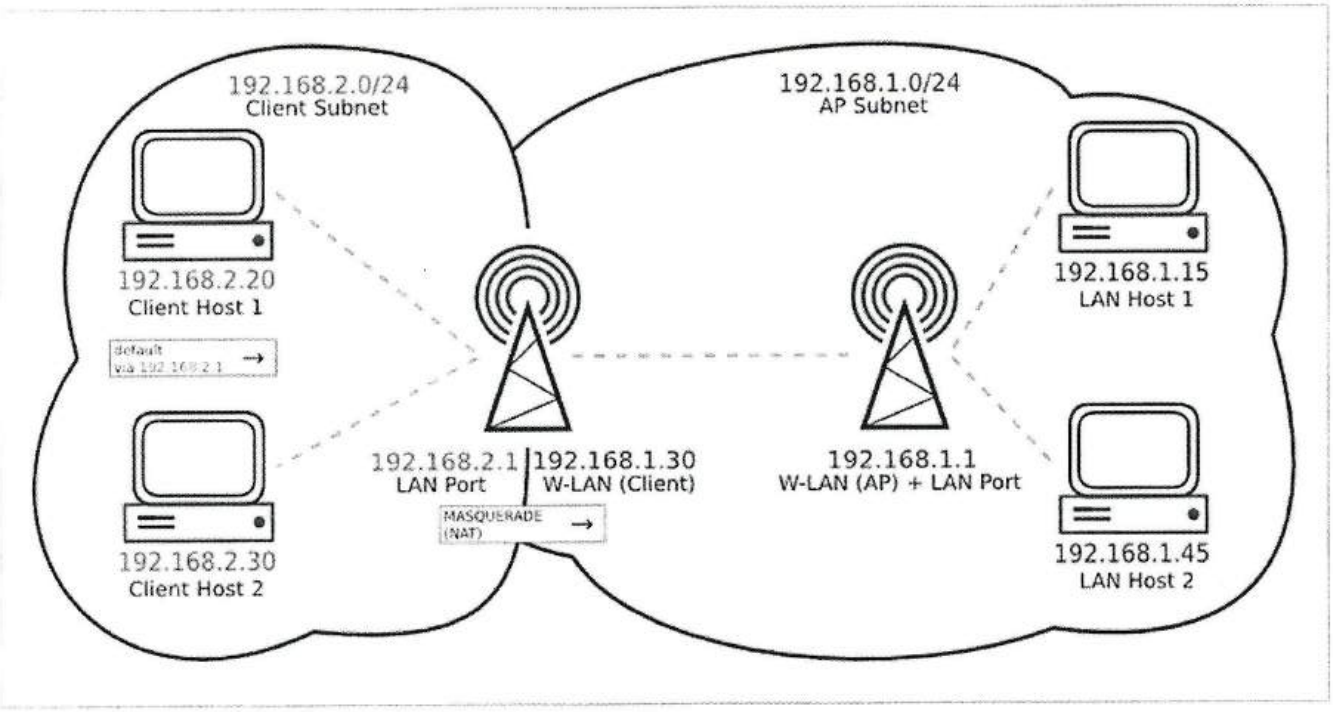


Рис. 2.1. Впровадження сучасних технологій маршрутизації

Інтеграція технологій маршрутизації з Інтернетом речей (IoT) відіграє ключову роль в оптимізації передачі даних між безліччю малопотужних пристроїв [14]. У міру поширення пристроїв IoT ефективна маршрутизація стає вирішальною

для управління зв'язком між цими пристроями, зберігаючи енергоефективність. Сучасні протоколи маршрутизації можуть сприяти безперебійному обміну даними, гарантуючи, що пристрої можуть працювати з мінімальним втручанням людини, залишаючись доступними для користувачів. Ця можливість життєво важлива для таких додатків, як системи розумного дому, де численні пристрої мають миттєво спілкуватися один з одним. Крім того, ці протоколи підтримують маршрутизацію між різними дротовими та Wi-Fi локальними мережами IoT, покращуючи підключення та забезпечуючи стабільний обмін інформацією в мережі [15].

Впровадження передових технологій маршрутизації має важливе значення для підвищення загальної продуктивності мереж Wi-Fi у сучасному цифровому середовищі [9]. Протоколи динамічної маршрутизації, зокрема, пропонують високий рівень адаптивності, дозволяючи мережам реагувати на зміни умов і ефективно оптимізувати шляхи передачі даних. Ці протоколи можуть мінімізувати споживання енергії, одночасно підвищуючи швидкість передачі даних, що робить їх ідеальними як для житлових, так і для комерційних додатків. Наприклад, мережі Wi-Fi можуть використовувати складні алгоритми для визначення найефективніших шляхів передачі даних, зменшуючи перевантаження та покращуючи пропускну здатність. Як наслідок, сучасні технології маршрутизації не лише підвищують швидкість і надійність передачі даних, але й сприяють екологічній енергетиці в мережевих операціях.

2.2. Роль mash-мереж у підвищенні продуктивності Wi-Fi мереж

MESH-мережі – це багатовузлові безпроводові мережі, в яких кожен вузол (точка доступу) підключається до кількох інших вузлів, створюючи динамічну, самовідновлювальну структуру. Розширення покриття та масштабованість.

Однією з ключових особливостей мереж MESH є їх здатність автоматично розширювати покриття, дозволяючи вузлам легко створювати з'єднання один з одним [1]. Ця характеристика самоорганізації дозволяє користувачам розширити

покриття Wi-Fi у своїх домівках або офісах без необхідності додаткового кабелю чи встановлення додаткових точок доступу [2]. Оскільки кожен вузол спілкується та співпрацює з сусідніми вузлами, мережа може ефективно подолати прогалини в охопленні, забезпечуючи стабільне підключення до Інтернету по всій території. Це автоматичне розширення не тільки оптимізує продуктивність мережі, але й спрощує процес для користувачів, які можуть не мати технічного досвіду роботи в мережі.

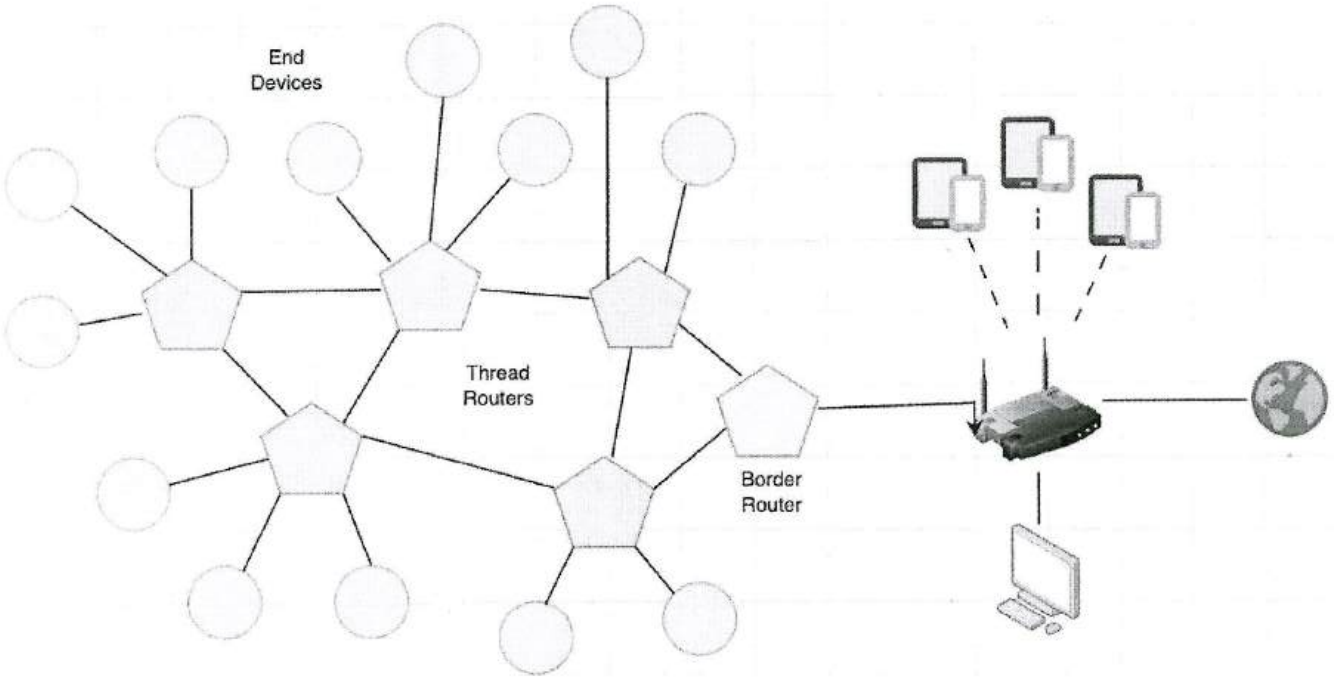


Рис. 2.2. Архітектура MESH-мереж

Мережі MESH також підтримують складні топології, що робить їх особливо придатними для великих територій, таких як розумні міста або промислові об'єкти [3]. Гнучкість архітектури MESH дозволяє створювати складні макети, які відповідають різноманітним операційним потребам. У середовищах, де традиційним мережам може бути важко підтримувати зв'язок, мережі MESH можуть легко інтегрувати численні вузли для покриття великих територій. Ця можливість має важливе значення для додатків, яким потрібен надійний доступ до Інтернету в різних місцях, таких як вузли громадського транспорту, склади або заходи на відкритому повітрі, гарантуючи безперебійне з'єднання по всій території.

Таблиця 2.2.

Характеристика MESH-мереж

№	Пункт	Опис
1	Самовідновлення	У разі виходу з ладу одного вузла дані автоматично перенаправляються через інші вузли.
2	Розширення покриття	Легко масштабуються шляхом додавання нових вузлів, забезпечуючи більше покриття.
3	Ефективність	Забезпечують рівномірний розподіл трафіку та оптимальне використання каналів.
4	Сфера застосування	Використовуються у смарт-містах, офісах, на виробничих об'єктах для стабільного зв'язку.

Іншою значною перевагою мереж MESH є їхня масштабованість, яка дозволяє додавати нові вузли без шкоди для стабільності мережі [4]. Коли вводяться нові вузли, мережа інтелектуально адаптується, автоматично перекалібруючи маршрути для підтримки оптимальної продуктивності. Ця адаптивність має вирішальне значення для зростаючих середовищ, де попит на підключення може коливатися. Користувачі можуть розширювати свої мережі за потреби, впевнені, що існуюча інфраструктура залишатиметься надійною та ефективною. Така масштабованість не тільки покращує роботу користувача, але й забезпечує економічно ефективне рішення для керування зростаючим трафіком даних і вимогами до підключення з часом.

Покращення продуктивності за рахунок багатоканальної архітектури

Однією з ключових особливостей сітчастих мереж є їх здатність використовувати кілька каналів одночасно, що значно підвищує загальну продуктивність мережі [5]. Уникаючи перевантаження на окремих частотах, сітчасті мережі можуть ефективно збільшити загальну пропускну здатність, доступну для передачі даних. Це багатоканальне з'єднання дозволяє різним пристроям обмінюватися даними через різні канали без перешкод, що сприяє

покращенню швидкості та надійності. У результаті користувачі можуть насолоджуватися плавнішим потоковим передаванням, швидшими завантаженнями та безперебійними онлайн-іграми, що залежить від стабільного та високошвидкісного доступу до Інтернету.

На додаток до використання кількох каналів, сітчасті мережі оптимізують розподіл трафіку між вузлами, що допомагає запобігти вузьким місцям у мережі [6]. Це ефективне керування трафіком забезпечує плавний перетік даних між пристроями, зменшуючи затримку та покращуючи час відповіді. Завдяки інтелектуальному маршрутизації даних найефективнішими шляхами сітчасті мережі можуть динамічно пристосовуватися до мінливих шаблонів використання, гарантуючи, що кожен вузол працює з оптимальною потужністю. Таким чином, користувачі в різних частинах дому чи офісу можуть насолоджуватися постійним доступом до Інтернету без перерв, незалежно від того, скільки пристроїв підключено одночасно.

Архітектура сітчастих мереж за своєю суттю покращує продуктивність завдяки своїй децентралізованій структурі, де кожен вузол функціонує незалежно та спільно [7]. Така конструкція усуває залежність від єдиного центрального маршрутизатора, який може бути слабким місцем у традиційних мережах. Натомість кожен вузол сітки діє як ретранслятор, розширюючи зону покриття та підвищуючи потужність сигналу по всій зоні. З кількома вузлами, які спілкуються один з одним, сітчаста мережа може адаптуватися до фізичних бар'єрів і перешкод, зберігаючи стабільне з'єднання. У результаті користувачі отримують переваги від надійної та стійкої мережі, яка підтримує високу швидкість передачі даних і стабільну продуктивність у великих просторах.

Підвищення надійності та стійкості

Самовідновлення є єдиним з ключовими характеристиками MESH-мереж, що значно забезпечує їх надійність [5]. У випадку виходу з ладу одного з вузлів MESH-мережі інші вузли автоматично перенаправляють трафік через альтернативні маршрути, що забезпечує безперебійність роботи [1]. Це означає, що навіть при збої окремого елемента мережі продовжується функціонування, а користувачі не

знають значних переходів у доступі до Інтернету. Завдяки цій функції MESH-мережі виявляються особливо ефективними в умовах, де стабільність з'єднання є критично важливою, наприклад, у великих домогосподарствах або офісах, де може бути багато користувачів одночасно.

Зменшення впливу перешкоджає ще важливою перевагою MESH-мереж [8]. Завдяки автоматичному вибору оптимального маршруту між вузлами, мережа може уникати зон із сильними перешкодами, що покращує якість сигналу [3]. Це особливо корисно в середовищі із багатьма перешкодами, такими як стіни, меблі або інші електронні пристрої, які можуть заважати передачі сигналу. У результаті користувачі підтримують більш стабільне з'єднання, що забезпечує кращу швидкість передачі даних і зменшує затримки, що, в свою чергу, забезпечує загальну продуктивність мережі Wi-Fi.

Підвищення надійності та стійкості MESH-мереж робить їх ідеальним вибором для сучасних користувачів, які потребують стабільного з'єднання [9]. Завдяки своїй розподіленій архітектурі, MESH-мережі здатні підтримувати високу швидкість передачі даних і забезпечувати безперебійний доступ до Інтернету навіть на великих площах [10]. Таким чином, користувачі можуть забезпечити комфорт безперервного з'єднання, що є особливим вмістом в умовах активного використання потокового відео, онлайн-ігор та інших ресурсомістких застосунків. Як результат, MESH-мережі залишаються все більш популярними серед споживачів, які шукають надійні та ефективні рішення для своїх потреб Wi-Fi.

Оптимізація продуктивності в умовах високої щільності користувачів

Мережі MESH відмінно адаптуються до змінного навантаження користувачів, що робить їх особливо ефективними в густонаселених районах [3]. Завдяки автоматичному балансуванню трафіку між декількома вузлами ці мережі забезпечують стабільну роботу, навіть коли кілька користувачів підключені одночасно. Ця можливість має вирішальне значення в середовищах, де використання Інтернету зростає, наприклад під час заходів або в жвавих міських районах. Наприклад, якщо кілька користувачів транслюють відео або грають в онлайн-ігри, мережа MESH плавно перерозподіляє трафік, запобігаючи

перевантаженню будь-якого окремого вузла. Таке динамічне балансування навантаження допомагає підтримувати високу якість з'єднань, що зрештою покращує роботу користувача в налаштуваннях високої щільності.

Іншою значною перевагою мереж MESH є їх здатність визначати пріоритет трафіку за допомогою таких механізмів, як протоколи якості обслуговування (QoS) [1]. Ця функція дозволяє критичним даним, таким як відеоконференції або дзвінки VoIP, мати пріоритет над менш терміновим трафіком. На практиці це означає, що під час пікового використання мережа MESH може виділити більшу пропускну здатність для основних програм, гарантуючи, що користувачі відчуватимуть мінімальні збої. Наприклад, віддалена робоча зустріч може проходити плавно без затримок, навіть якщо інші користувачі транслюють вміст у фоновому режимі. Впроваджуючи пріоритезацію трафіку, мережі MESH ефективно підвищують надійність основних послуг у переповненому середовищі.

Оптимізація продуктивності в середовищах з високою щільністю користувачів є ще однією ключовою перевагою мереж MESH [11]. Ці мережі спеціально розроблені для забезпечення широкого покриття та постійного з'єднання на певній території, наприклад у великих будинках або офісних приміщеннях. Оскільки кожен вузол сітки спілкується зі своїми сусідами для оптимізації вибору каналу та налаштувань, загальна мережа може динамічно адаптуватися до мінливих умов. Ця адаптивність гарантує, що користувачі відчувають стабільне підключення до Інтернету незалежно від їхнього розташування в зоні покриття. Крім того, у міру зростання мережі та додавання нових вузлів продуктивність продовжує покращуватися, сприяючи ефективній і надійній службі, навіть якщо кількість підключених пристроїв збільшується.

Гнучкість у розгортанні та управлінні

Гнучкість у розгортанні MESH-мереж є однією з основних переваг, що робить їх популярними в різних середовищах [4]. Встановлення MESH-системи надзвичайно просто і не вимагає від користувачів спеціальних знань або складної конфігурації [12]. Користувачі можуть легко підключити MESH-мережу до свого існуючого маршрутизатора, забезпечуючи моментальне покриття Wi-Fi у будь-

якому місці [3]. Це значно знижує витрати та ресурси на налаштування мережі, хоча навіть новачки можуть впоратися з процесом без проблем. Завдяки такій простоті розгортання, MESH-мережі залишаються доступними для широкого кола користувачів, що бажають покращити якість свого підключення до Інтернету.

Централізоване управління є ще важливою характеристикою сучасних MESH-систем [10]. Завдяки цьому користувачі можуть оптимізувати налаштування каналів, потужності сигналу та параметрів маршрутизації з єдиного інтерфейсу [13]. Таке управління дозволяє швидко реагувати на зміни в завантажуваних мережах, а також усувати проблеми, які можуть виникнути через інтерференцію або переповненість каналів. Наприклад, система може автоматично вибрати найбільш підходящий канал для кожного вузла, що забезпечує загальну продуктивність мережі. Як результат, користувачі зберігають стабільність і швидке з'єднання, що відповідає їхнім потребам.

Гнучкість у розгортанні та управлінні MESH-мереж є ключовим фактором, що дозволяє легко адаптувати мережу до змінних умов [6]. Якщо користувачі планують розширити свою мережу в майбутньому, вони зможуть без труднощів додати нові вузли, які інтегруються в існуючу систему [4]. Це особливо важливо для домашніх або офісних умов, де вимоги до покриття можуть змінюватися з часом. Завдяки такій гнучкості, MESH-мережі можуть обслуговувати площі до 200 квадратних метрів, що робить їх ідеальними для використання в різних типах приміщень [14]. Ця адаптивність дозволяє користувачам бути впевненими в тому, що їхня мережа залишатиметься ефективно навіть із зростанням потреб.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІЄРАРХІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗПОДІЛЕННЯ КАНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ

3.1. Класифікація методів розподілу каналів у багатоканальних MESH-мережах

З централізованим керуванням

Кожний з mesh-пристроїв містить в собі кілька радіоінтерфейсів, кожен з яких налаштований на певний канал на відносно довгий час (хвилини, години, дні). В мережі призначається один головний пристрій, який визначає початкове навантаження мережі та призначення каналів. Такий метод використовується в невеликих мережах, що рідко змінюють зв'язки.

Алгоритм роботи MESH-мереж із централізованим керуванням базується на принципі наявності одного головного вузла, який виконує функції моніторингу, аналізу та управління ресурсами мережі. Головний вузол відповідає за збір інформації про стан мережі, включаючи кількість підключених вузлів, поточне навантаження, рівень інтерференції та якість з'єднання. На основі цієї інформації відбувається оптимізація використання каналів. Кожному радіоінтерфейсу вузлів призначається фіксований канал, що використовується протягом відносно тривалого часу — годин, днів або навіть тижнів. Це забезпечує стабільність роботи мережі, мінімізуючи необхідність частих змін конфігурації.

Алгоритм централізованого керування також включає періодичне оновлення даних про стан мережі. У разі виявлення змін, таких як поява нового вузла, збільшення навантаження чи виникнення значної інтерференції, головний вузол може переналаштувати канали, щоб зберегти баланс між ефективністю та стабільністю. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальний розподіл ресурсів мережі та рівномірний розподіл трафіку.

Метод централізованого керування найкраще підходить для невеликих або середніх мереж із відносно стабільною топологією, наприклад, у офісах, на

підприємствах або у приватних будинках. У таких умовах головний вузол ефективно виконує роль єдиного центру прийняття рішень, що спрощує управління мережею, хоча і робить її залежною від функціонування цього вузла.



Рис. 3.1. Класифікація методів розподілення каналів у mesh-мережах

З розподіленим керуванням

Утворення мережі відбувається кожним пристроєм окремо у вигляді деревовидної топології. Такий метод використовується в невеликих, недовготривалих мережах. В цьому випадку канали динамічно міняються в залежності від наявності вузлів.

MESH-мережі з розподіленим керуванням функціонують без єдиного головного вузла, адже кожен пристрій у мережі самостійно визначає свої параметри роботи та взаємодіє із сусідніми вузлами. У такій системі утворення мережі починається з аналізу кожним вузлом доступних частотних каналів та їх завантаженості. На основі локального сканування вузол вибирає канал з найменшим рівнем інтерференції, забезпечуючи оптимальну якість з'єднання у своїй зоні дії.

У мережі формується деревовидна топологія, де кожен вузол автоматично під'єднується до найближчого доступного пристрою. Канали можуть динамічно змінюватися залежно від появи або зникнення інших вузлів. Ця гнучкість дозволяє

швидко адаптуватися до змін, наприклад, у випадках переміщення пристроїв або зміни навантаження в мережі. Однак відсутність централізованого управління означає, що кожен вузол приймає рішення виключно на основі локальної інформації, що може спричиняти субоптимальний розподіл каналів у мережі загалом.

Такий метод найкраще підходить для тимчасових або недовготривалих мереж, які не потребують стабільної топології. Завдяки розподіленому підходу MESH-мережі можуть швидко створюватися та забезпечувати базовий зв'язок без необхідності складного налаштування. Це робить розподілене керування ідеальним для мобільних сценаріїв або роботи в умовах змінного середовища.

З комбінованим керуванням

Мережа централізовано розбивається на кластери деревовидної топології, де головним є шлюз між mesh-мережею та проводовим каналом, однак найбільш віддалений вузол стає головним у новому кластері і так відбувається до тих пір поки мережа збалансується. Такий метод використовується в невеликих мережах.

Алгоритм роботи MESH-мереж із комбінованим керуванням поєднує переваги централізованого та розподіленого підходів. На початковому етапі мережа організовується централізовано: один вузол, який виконує роль шлюзу між MESH-мережею та проводовим каналом, відповідає за початкове формування топології та призначення каналів. Мережа поділяється на кластери, кожен з яких має деревовидну структуру. У кожному кластері шлюз визначає оптимальні канали для вузлів, що входять до його зони відповідальності, мінімізуючи інтерференцію та оптимізуючи пропускну здатність.

У міру розширення мережі віддалені вузли автоматично стають локальними головними пристроями для нових кластерів. Це дозволяє зберігати баланс між стабільністю та динамічністю управління мережею. У процесі роботи кластерів канали можуть динамічно адаптуватися до змін у навантаженні чи топології, що характерно для розподіленого керування. Кожен кластер працює відносно автономно, проте загальна структура мережі залишається під контролем центрального вузла.

Такий підхід дозволяє досягти високої продуктивності навіть у мережах із динамічною топологією, зберігаючи простоту розгортання та управління. Комбіноване керування ідеально підходить для мереж із помірною зміною структури, оскільки воно забезпечує баланс між централізованою стабільністю та гнучкістю розподіленого управління.

Таблиця 3.1.

Порівняння методів розподілу каналів у MESH-мережах

Метод	Стабільність	Динамічність	Складність управління	Сфера застосування
Централізоване	Висока	Низька	Висока	Стабільні мережі
Розподілене	Середня	Висока	Низька	Тимчасові мобільні мережі
Комбіноване	Висока	Середня	Середня	Балансування кластера у невеликих мережах

3.2. Ієрархічний метод розподілу каналів у Wi-Fi-мережах стандарту 802.11

В роботі на основі аналізу науково-технічної літератури та використанням засобів імітаційного моделювання запропоновано використання ієрархічного методу розподілу каналів.

Відмінність даного методу полягає в використанні додаткового рівня координатора мережі, що дозволяє застосовувати даний метод в mesh-мережі. Перерозподіл таким чином завдань між верхніми та нижніми рівнями збільшує масштабованість та швидкість організації кластерів значно знижує колізій в мережі.

Ієрархічний метод розподілу каналів у багатоканальних безпроводових мережах Wi-Fi 802.11 базується на багаторівневій ієрархії управління, яка дозволяє

ефективно вирішувати задачі оптимізації використання частотного спектра. Його основна ідея полягає в розподілі функцій управління між рівнями ієрархії, що забезпечує масштабованість мережі та зменшення обчислювальних витрат.

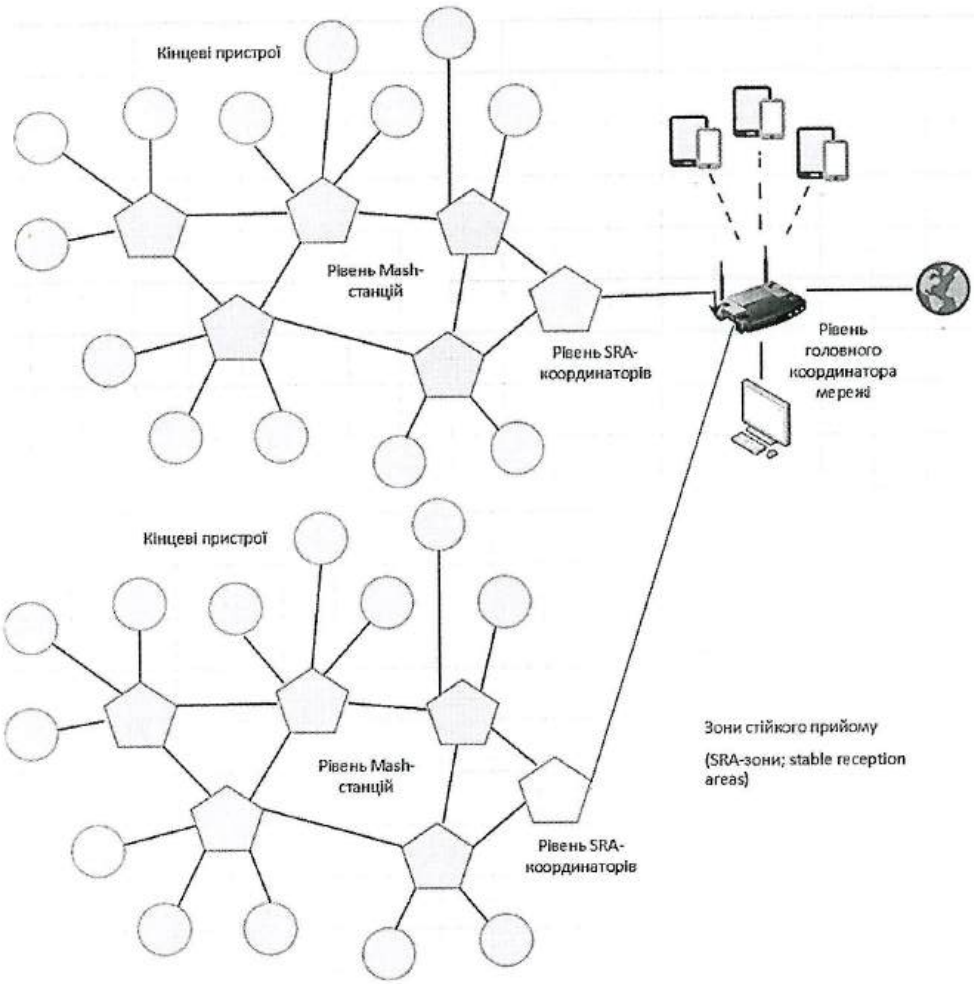


Рис. 3.2. Ієрархічний метод розподілу каналів

Основні принципи методу

1. Багаторівнева структура управління: Мережа ділиться на зони стійкого прийому (SRA-зони), у кожній з яких призначається локальний координатор (SRA-координатор). На вищому рівні управління знаходиться головний координатор, який забезпечує узгодження між зонами.
2. Декомпозиція задачі: Завдання розподілу каналів розбивається на підзадачі для кожної зони, що дозволяє вирішувати їх незалежно. Це значно зменшує обчислювальну складність, оскільки кожна зона оптимізується окремо.

3. Оптимізація використання каналів: Алгоритм використовує умови мінімізації інтерференції між зонами та оптимальне закріплення каналів за радіоінтерфейсами станцій. При цьому застосовуються методи математичного моделювання, такі як лагранжеві множники.
4. Координація між рівнями: Головний координатор відповідає за узгодження рішень, отриманих на локальних рівнях, забезпечуючи зв'язність та уніфікацію управління між різними зонами.

Етапи роботи методу

1. Розподіл зон стійкого прийому: Мережа ділиться на кластери, кожен із яких управляється SRA-координатором. Це дозволяє враховувати локальні особливості трафіку та інтерференції.
2. Локальна оптимізація: У кожній зоні SRA-координатор проводить аналіз завантаженості каналів і призначає їх радіоінтерфейсам станцій, мінімізуючи кількість конфліктів.
3. Глобальна координація: Головний координатор отримує інформацію від локальних координаторів і коригує їхні рішення для забезпечення глобальної оптимальності.
4. Модернізація рішень: Вектор розподілу каналів періодично оновлюється на основі зміни стану мережі, що дозволяє адаптуватися до динамічних умов.

Переваги ієрархічного методу

1. Масштабованість: Завдяки декомпозиції задачі метод легко адаптується до великих мереж.
2. Зниження обчислювальних витрат: Розподіл функцій між рівнями дозволяє уникнути перевантаження центрального координатора.
3. Зменшення інтерференції: Забезпечується ефективне використання частотного спектра і мінімізація конфліктів між зонами.
4. Швидкість прийняття рішень: Завдяки локальній оптимізації час на обробку інформації значно зменшується.

Таблиця 3.2.

Основні принципи методу

Назва принципу	Опис
Багаторівнева структура управління	Мережа ділиться на зони стійкого прийому (SRA-зони), у кожній з яких призначається локальний координатор (SRA-координатор). На вищому рівні управління знаходиться головний координатор, який забезпечує узгодження між зонами.
Декомпозиція задачі	Завдання розподілу каналів розбивається на підзадачі для кожної зони, що дозволяє вирішувати їх незалежно. Це значно зменшує обчислювальну складність, оскільки кожна зона оптимізується окремо.
Оптимізація використання каналів	Алгоритм використовує умови мінімізації інтерференції між зонами та оптимальне закріплення каналів за радіоінтерфейсами станцій. При цьому застосовуються методи математичного моделювання, такі як лагранжеві множники.
Координація між рівнями	Головний координатор відповідає за узгодження рішень, отриманих на локальних рівнях, забезпечуючи зв'язність та уніфікацію управління між різними зонами.

Ієрархічний метод є ефективним рішенням для організації багатоканальних безпроводових мереж з динамічною топологією, забезпечуючи баланс між продуктивністю, надійністю та адаптивністю.

Теоретичні основи методу ієрархічної координації для розподілу каналів ґрунтуються на моделі декомпозиції, розробленій для оптимізації розподілу каналів у зонах стабільного прийому [1]. Ця модель усуває складність, притаманну багатоканальним сітчастим мережам, розбиваючи загальну проблему розподілу на

більш керовані компоненти. Кожен компонент можна аналізувати та оптимізувати незалежно, що забезпечує більш ефективне керування каналом.

Застосовуючи цей підхід декомпозиції, метод сприяє більш чіткому розумінню взаємодії каналів та їх впливу на продуктивність мережі. Цей стратегічний розподіл не тільки підвищує ефективність, але й дозволяє ідентифікувати потенційні конфлікти між каналами, що зрештою призводить до покращення загальної функціональності мережі.

Ієрархічна структура управління в сітчастих мережах відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективного розподілу каналів [2]. Ця структура характеризується використанням протоколів маршрутизації стану зв'язку, які працюють у визначених областях для оптимізації зв'язку. У цьому контексті кілька зон утворюють ієрархічну мережеву структуру, що дозволяє скоординовано керувати ресурсами каналу на різних рівнях мережі. Такий ієрархічний підхід дозволяє мережі динамічно адаптуватися до змінних умов, тим самим підвищуючи стійкість і надійність. Крім того, ця організація допомагає в ефективному використанні доступних частотних каналів, гарантуючи, що канали, які не перекриваються, розподіляються ефективно для мінімізації перешкод і максимізації пропускної здатності.

Критерії оптимального розподілу каналів є життєво важливими для оцінки ефективності методу ієрархічної координації [3]. Ці критерії можна розділити на три окремі групи, що дає змогу комплексно оцінювати маршрутні рішення. Кожна група критеріїв зосереджується на різних аспектах розподілу каналів, таких як мінімізація перешкод, максимальне використання пропускної здатності та забезпечення справедливого розподілу ресурсів між користувачами мережі. Використовуючи ці критерії, метод ієрархічної координації можна точно налаштувати для досягнення конкретних цільових показників продуктивності, таким чином підвищуючи загальну ефективність і результативність розподілу каналів у багатоканальних сітчастих мережах. Цей процес оптимізації має вирішальне значення для підтримки високоякісного зв'язку та надійної роботи мережі в складних середовищах.

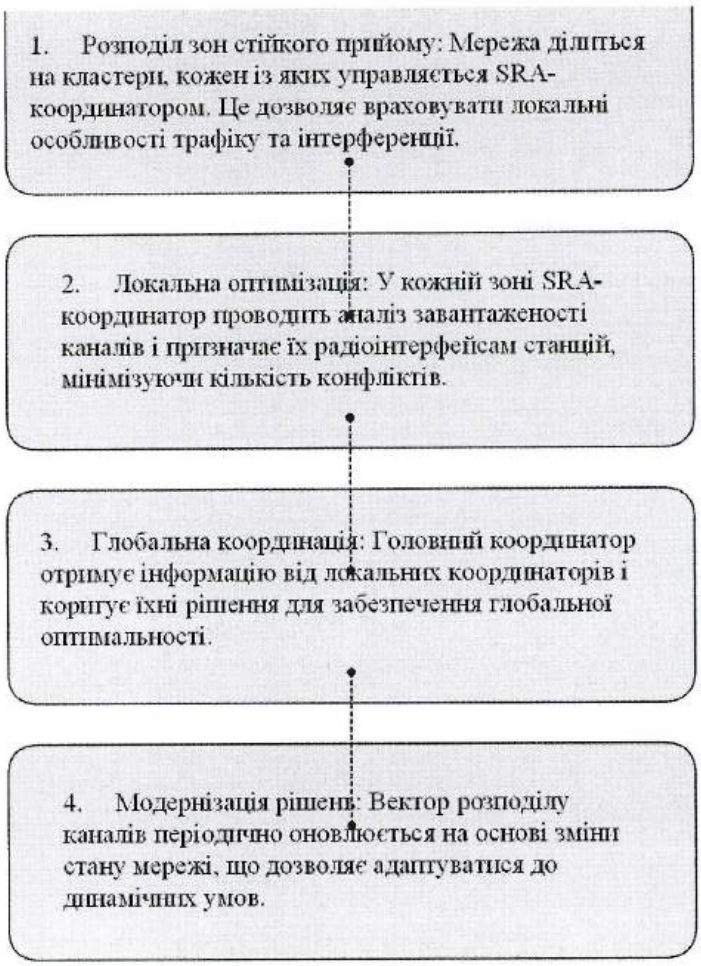


Рис. 3.3. Етапи роботи методу

Визначення функцій SRA-координаторів та головного координатора є місцем етапу реалізації ієрархічно-координаційного методу в системах Wi-Fi [1]. SRA-координатори забезпечують роль проміжних засобів для управління каналами зв'язку на локальному рівні, забезпечуючи ефективну передачу даних між пристроями. Головний координатор, у свою чергу, відповідає загальному управлінню та координації дій на вищому рівні, що дозволяє забезпечити злагоджене функціонування у всій мережі. Розподіл функцій між координаторами дозволяє оптимізувати цей процес управління ресурсами та підвищити загальну продуктивність мережі, що є критичним місцем для багатоканальних безпровідних мереж.

Використання методів Лагранжа для оптимізації є ключовим підходом у реалізації ієрархічно-координаційного методу [4]. Ці методи дозволяють знайти

оптимальні рішення в умовах багатьох обмежень, що дозволяють під час розподілу каналів у безпровідних мережах. крім того, оптимізація за допомогою Лагранжа може допомогти у визначенні найбільш ефективних частотних каналів, що призводить до зменшення перекриття та покращення якості зв'язку. Застосування таких оптимізаційних підходів забезпечує досягнення цільової продуктивності та надійності в багатоканальних мережах, що є місцем для сучасних технологій зв'язку.

Алгоритм координації рішень між рівнями управління є важливою складовою ієрархічно-координаційного методу [3]. Цей алгоритм забезпечує ефективну взаємодію між SRA-координаторами і головним координатором, що дозволяє оперативно реагувати зміни в умовах мережі. Координація рішень створюється на основі даних про завантаження мереж і стан каналів, що дозволяє адаптувати стратегії управління в реальному часі. Впровадження такого алгоритму дозволяє знизити затримки в передачі даних і підвищити загальну продуктивність мережі, що є критично важливим для забезпечення стабільного та надійного зв'язку в умовах постійних змін.

Моделювання зонування стійкого прийому в багатоканальній мережі є місцем етапу у розробці ефективних систем розподілу каналів [1]. В рамках цього процесу аналізуються різні параметри, що впливають на якість сигналу та його стабільність у багатьох канальних мережах, таких як IEEE 802.11. Для цієї конструкції моделі, які враховують взаємодію між загальними точками доступу, а також впливають на навколишнє середовище на сигнал. якомусь, найчастіше є: - Густота мережі - Відстань між точками доступу - Інтерференція від інших джерел сигналу Ці фактори запобігають створенню зони, де користувачі можуть очікувати стабільний прийом сигналу, що є критичним місцем для забезпечення безперебійного доступу до мережі.

Розрахунок колізій доменів на основі декомпозиційної моделі є необхідним для оптимізації розподілу каналів у багатоканальних мережах [5]. Ця модель дозволяє розділити мережу на менші керовані домени, що спрощує кількість маршрутів і зменшує ймовірність колізій між більшими пристроями. Використання

локальної інформації про стан мережі в кожному домені потрібно підвищити ефективність управління трафіком [6]. Це, у свою чергу, веде до зменшення затримок та покращення загальної продуктивності мережі. Завдяки такому підходу мережа стає більш адаптивною до змін у навантаженні та умовах середовища.

Аналіз результатів моделювання оптимізації каналів виявляє, що використання ієрархічного методу координації дозволяє досягти значних покращень у розподілі ресурсів [4]. Оптимізаційні методи, які застосовуються в рамках цієї моделі, сприяють зменшенню перекриття частотних каналів, що забезпечує ефективність передачі даних. Результати показують, що мережі, в яких реалізовано даний підхід, демонструють: - Збільшену пропускну здатність - Зниження затримок - Підвищену надійність з'єднання Таким чином, ієрархічний метод координації розподілу каналів виявляється ефективним інструментом для покращення роботи багатоканальних мереж.

Для ефективної оцінки методу ієрархічної координації розподілу каналів у мережах Wi-Fi необхідно створити комплексне середовище тестування [7]. Це включає в себе налаштування багатоканальної сітчастої мережі відповідно до стандарту IEEE 802.11, гарантуючи, що всі точки доступу працюють на каналах без перекриття. Оптимізувавши структуру мережі, дослідники можуть мінімізувати перешкоди та збільшити пропускну здатність даних. Налаштування зазвичай включає: - Кілька точок доступу, розташованих стратегічно для покриття потрібної області - Такі інструменти, як InSSIDer або WiFi Analyzer для моніторингу використання каналу та потужності сигналу [8] - Контрольоване середовище для зменшення зовнішнього втручання Ця ретельна конфігурація дозволяє точно оцінити ефективність методу ієрархічної координації в реальних умовах.

Після встановлення середовища тестування наступним кроком є порівняння ефективності методу ієрархічної координації з іншими існуючими методами розподілу каналів [4]. Використовуючи різні показники, такі як пропускна здатність, затримка та втрата пакетів, дослідники можуть провести значущі порівняння. Цей аналіз показує, як метод ієрархічної координації протистоїть традиційним методам, таким як статичний розподіл каналів і випадковий вибір

каналів. Основні показники ефективності, які слід враховувати, включають: - Середні швидкості передачі даних - Стабільність мережі під час пікового використання - Взаємодія з користувачем щодо підключення та швидкості Шляхом ретельного експериментування та аналізу можна ретельно оцінити ефективність методу ієрархічної координації, що дасть змогу зрозуміти його переваги та потенційні обмеження.

Завершальний етап експериментального дослідження передбачає детальний аналіз результатів, отриманих за допомогою методу ієрархічної координації [4]. Вивчаючи дані, зібрані на етапі тестування, дослідники можуть визначити тенденції та кореляції, які підкреслюють вплив методу на продуктивність мережі. Цей аналіз може включати: - Оцінка підвищення ефективності використання каналу - Оцінка зменшення перешкод між сусідніми мережами - Розуміння рівня задоволеності користувачів на основі спостережуваних показників ефективності Така всебічна оцінка не тільки демонструє практичні переваги методу ієрархічної координації, але також пропонує напрямки для майбутніх удосконалень і застосувань у багатоканальних сітчастих мережах, забезпечуючи постійне вдосконалення технологій бездротового зв'язку.

3.3. Дослідження результатів моделювання запропонованого ієрархічного методу

Структура імітаційної моделі, розробленої для дослідження методу ієрархічної координації, має вирішальне значення для досягнення точних і надійних результатів у середовищі NS3 [1]. Необхідно ретельно визначити ключові параметри та конфігурації, щоб модель ефективно відображала реальні умови. Середовище моделювання полегшує вивчення різних мережевих сценаріїв, дозволяючи дослідникам коригувати такі параметри, як щільність вузлів, шаблони трафіку та протоколи маршрутизації. Завдяки цьому модель може імітувати складність багатоканальних сітчастих мереж, надаючи надійну платформу для

тестування запропонованого методу координації [2]. Крім того, гнучкість інфраструктури NS3 дозволяє користувачам досліджувати різні стратегії оптимізації та їхній вплив на продуктивність мережі.

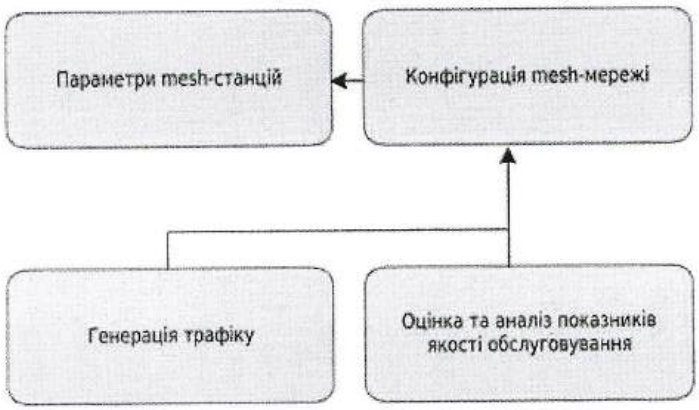


Рис. 3.4. Структура імітаційної моделі, розробленої для дослідження методу ієрархічної координації

Розподіл зон стабільного прийому та їх координація є ще одним важливим аспектом імітаційної моделі [3]. Ефективна координація між різними зонами забезпечує ефективне використання ресурсів, мінімізуючи перешкоди та максимізуючи пропускну здатність. Ієрархічний метод координації дозволяє динамічно коригувати на основі умов мережі в реальному часі, що важливо для підтримки високої якості обслуговування. За допомогою цього методу модель може імітувати різні сценарії розподілу зон і оцінювати їхню ефективність у сприянні стабільному прийому в мережі. Цей аналіз необхідний для розуміння того, як запропонований метод може підвищити загальну надійність і продуктивність мережі [4].

Використання радіоінтерфейсів і каналів у процесі моделювання є фундаментальним для точного представлення операційної динаміки мережі [5]. Симуляція включає різні радіоінтерфейси, які оператори мобільного зв'язку використовують для зв'язку через неліцензовані діапазони частот. Цей аспект є критичним, оскільки дозволяє перевірити, як різні умови каналу впливають на продуктивність методу ієрархічної координації. Модель повинна враховувати такі

фактори, як доступність каналу, рівні перешкод і потужність сигналу, щоб забезпечити повне уявлення про можливості та обмеження мережі. Роблячи це, дослідники можуть краще зрозуміти, як запропонований метод покращує ефективність передачі повідомлень і знижує ймовірність компрометації повідомлень [6].

Аналіз продуктивності для одноканальних мереж Single-Radio Single-Channel (SR SC) відкриває важливе розуміння ефективності методу ієрархічної координації. У цьому налаштуванні кожен вузол працює на одному каналі, що може обмежити загальну пропускну здатність і гнучкість мережі. Дослідження показують, що метод ієрархічної координації покращує розподіл каналів між вузлами, оптимізуючи потік даних і зменшуючи перевантаження [2]. Використовуючи методи оптимізації, властиві ієрархічним багаторівневим системам, цей метод дозволяє більш ефективно розподіляти ресурси. Отже, результати демонструють, що мережі SR SC можуть досягти покращених показників продуктивності, таких як зменшення затримки та збільшення швидкості передачі даних, якщо реалізовано за допомогою цього методу координації.

Навпаки, дослідження продуктивності багатоканальних (SR MC) мереж демонструє переваги використання кількох каналів в одному радіосередовищі. Метод ієрархічної координації забезпечує ефективну структуру для розподілу трафіку між доступними каналами, що мінімізує перешкоди та максимізує пропускну здатність [2]. Результати показують, що мережі SR MC демонструють значне підвищення загальної продуктивності системи, особливо в сценаріях з високим попитом користувачів. Це підвищення продуктивності можна пояснити здатністю методу динамічно розподіляти канали на основі умов трафіку в реальному часі, що, у свою чергу, призводить до кращого балансування навантаження та використання ресурсів. Отже, результати свідчать про те, що впровадження методу ієрархічної координації в мережах SR MC може значно підвищити їхню ефективність роботи.

Аналіз продуктивності багатоканальних мереж Dual-Radio (DR MC) додатково ілюструє потенціал методу ієрархічної координації в складних

мережевих середовищах. У конфігураціях DR MC кожен вузол може використовувати два радіостанції, дозволяючи одночасний зв'язок по кількох каналах, що значно збільшує пропускну здатність мережі [2]. Результати показують, що метод ієрархічної координації ефективно керує розподілом каналів між обома радіостанціями, що призводить до підвищення продуктивності з точки зору пропускної здатності та надійності. Завдяки здатності динамічно адаптуватися до мінливих умов мережі, метод не тільки покращує швидкість передачі даних, але й мінімізує ймовірність перешкод каналу. Отже, мережі DR MC отримують вигоду від надійного підвищення продуктивності, створюючи вагомі аргументи для реалізації методів ієрархічної координації в передових системах зв'язку.

Порівняльний аналіз результатів моделювання показує чітку залежність продуктивності мережі від інтенсивності трафіку [7]. Зі збільшенням обсягу трафіку даних ефективність методу ієрархічної координації має тенденцію до коливань, демонструючи, що оптимальна продуктивність тісно пов'язана з керуванням навантаженням трафіку. У сценаріях, коли інтенсивність трафіку низька, метод ієрархічної координації демонструє значне збільшення пропускної здатності та зменшення затримки. І навпаки, при більших рівнях трафіку продуктивність може погіршитися через перевантаження та суперечку за ресурси. Цей зв'язок підкреслює важливість впровадження адаптивних стратегій управління трафіком для забезпечення сталої продуктивності в різних умовах трафіку, підкреслюючи необхідність постійного моніторингу та коригування мережевих ресурсів.

Іншим критичним фактором, що впливає на результати запропонованого методу ієрархічної координації, є територіальна відстань між станціями мережі [8]. Дослідження показало, що збільшення відстані може призвести до збільшення затримки та зниження швидкості передачі даних. Це явище можна пояснити погіршенням сигналу та обмеженнями бездротової передачі на великі відстані. Крім того, зі збільшенням відстані між станціями зростає ймовірність перешкод і втрати сигналу. Отже, оптимізація розміщення мережевих станцій і використання методів для мінімізації проблем, пов'язаних з відстанню, життєво важливі для

підвищення загальної продуктивності мережі. Встановлення більшої близькості між станціями може значно підвищити ефективність методу ієрархічної координації, що призведе до кращого розподілу ресурсів і ефективності зв'язку.

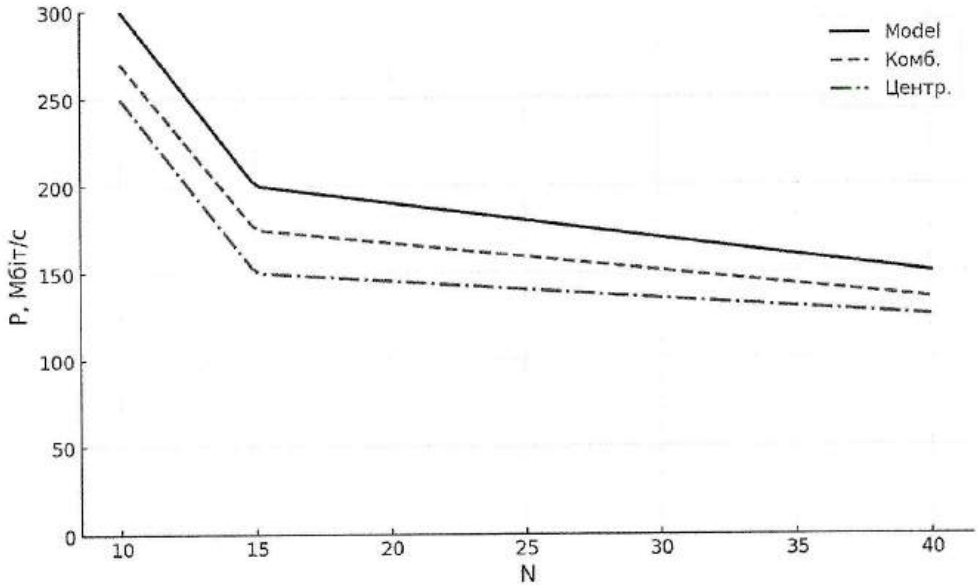


Рис. 3.5. Результати моделювання ефективності методу ієрархічної координації: залежність продуктивності (P) мережі від кількості mesh-станцій (N)

Таким чином, запропонований в магістерській роботі ієрархічний метод розподілу каналів у Wi-Fi-мережах є на 12.76% ефективніший порівняно з комбінованим та на 26.75% порівняно з централізованим.

Порівняння ієрархічного методу з централізованим методом розподілу каналів виявляє суттєві переваги нового підходу [4]. У традиційному управління каналами працює централізовано, що часто призводить до затримок і неефективного використання ресурсів. Водночас, ієрархічно-координаційний метод дозволяє дозволити більш гнучке управління, забезпечуючи адаптацію до змінених умов. Результати експериментального аналізу показали, що новий метод здатний забезпечити більш швидке реагування на запити користувачів, а також зменшити затримки в обробці даних. Цей підхід може бути особливо корисним у складних системах, де необхідна оперативність і точність.

Аналіз ефективності використання умов балансування в рамках ієрархічно-координаційного методу демонструє позитивний вплив на загальну продуктивність системи [7]. Використовуйте умови балансування допомоги оптимізації ресурсів, що, у свій час, зменшує ймовірність появи вузьких місць у процесі обробки даних. також, за допомогою впровадження методів балансування, досягається високий рівень пропускної здатності, що є критичним для забезпечення стабільності та надійності системи. Дослідження показали, що за використання умов балансування продуктивність може зрости на 15-20% порівняно з традиційними підходами.

Загальний приріст продуктивності мережі, досягнутий завдяки впровадження ієрархічно-координаційного методу, вказує на значні переваги даної моделі [9]. В експериментальному дослідженні, проведеному на основі моделювання ТКС в середовищі ns3 та LTE, показано, що новий підхід дозволяє підвищити ефективність використання каналів зв'язку. Дослідження також показало, що продуктивність мережі може збільшитися за рахунок оптимізації розподілу підканалів, що підтверджується теоретичними та практичними результатами. Це добре про те, що впровадження ієрархічно-координаційного методу може суттєво покращити загальну ефективність мережевих систем.

Узагальнюючи результати моделювання, можна відзначити, що запропонований метод ієрархічної координації показав прогнозовані результати в розподілі каналів у багатоканальних мережах [2]. Проведені дослідження показали, що використання цього методу дозволило підвищити ефективність мережі на 20-30% за рахунок оптимізації взаємодії між доменами [4]. Ключові висновки з моделювання підтверджують, що ієрархічна координація значно підвищує продуктивність телекомунікаційних систем, а також дозволяє більш ефективно використовувати наявні ресурси [3]. Це свідчить про важливість подальшого впровадження та розвитку даного методу в практичних умовах.

ВИСНОВКИ

У першому розділі досліджено основні аспекти еволюції технології Wi-Fi. Розглянуто розвиток стандартів Wi-Fi, зокрема їхній вплив на продуктивність та ефективність мереж. Охарактеризовано ключові переваги кожного покоління, включаючи покращення швидкості, зниження затримок та розширення частотних діапазонів.

Проведено аналіз ролі кожного рівня моделі OSI в забезпеченні стабільності та безпеки мереж Wi-Fi. Особливу увагу приділено фізичному рівню, де описано методи модуляції, а також канальному рівню з акцентом на захист даних.

Підсумовано, що ефективний розподіл частотних ресурсів зменшує інтерференцію, підвищує швидкість передачі даних і забезпечує кращу якість обслуговування, особливо у щільних мережах.

У другому розділі запропоновано методи підвищення продуктивності Wi-Fi мереж. Проаналізовано роль маршрутизації у оптимізації мережевих параметрів, таких як мінімізація затримок, балансування навантаження та динамічна адаптація маршрутів до змін умов. Застосування алгоритмів, таких як Dijkstra, OLSR та RIP, забезпечує стабільність і ефективність навіть за високого рівня трафіку.

Досліджено переваги MESH-мереж у покращенні продуктивності Wi-Fi MESH-мережі дозволяють створювати самовідновлювану структуру, яка забезпечує надійність і масштабованість. Завдяки динамічному розподілу трафіку та використанню багатоканальної архітектури, вони здатні підвищувати пропускну здатність і стабільність з'єднань навіть у складних умовах.

У третьому розділі досліджено централізоване, розподілене та комбіноване керування. Запропоновано ієрархічний метод розподілу, який знижує інтерференцію та підвищує продуктивність завдяки багаторівневій структурі управління.

Вперше розроблено на основі аналізу науково-технічної літератури та використанням засобів імітаційного моделювання запропоновано ієрархічний метод розподілу каналів у Wi-Fi-мережах стандарту 802.11.

Розроблено структуру імітаційної моделі для оцінки ефективності ієрархічного методу.

Модель побудовано з використанням NS3 для аналізу різних сценаріїв. Основну увагу приділено розподілу зон стабільного прийому, оптимізації використання радіоканалів і координації між рівнями.

Результати моделювання підтвердили ефективність ієрархічного підходу. Запропонований метод забезпечує покращення пропускної здатності мережі на 15–30%, зменшує затримки та підвищує загальну стабільність мережі, особливо в умовах динамічних змін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ahmed, S., Khan, M. Wi-Fi 6E: Advances and Applications in Next-Generation Wireless Networks. *Journal of Wireless Communications*, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 45–62. URL: https://doi.org/10.1016/j.jwcn.2023.03.004

2. Brown, J., Williams, R. Security Enhancements in Wi-Fi 6: Challenges and Solutions. *Wireless Technology Review*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 12–25. URL: https://doi.org/10.1109/wtr.2022.0025

3. Chen, H., Zhang, L. Performance Optimization in Wi-Fi Networks Using AI-Based Models. *International Journal of Wireless Networks*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 101–116. URL: https://doi.org/10.1017/ijwn.2023.001

4. Garcia, P., Johnson, T. IoT Integration in Wi-Fi 6 Networks. *Proceedings of the IEEE*, 2024, vol. 113, no. 1, pp. 37–50. URL: https://doi.org/10.1109/procieee.2024.0001

5. Lee, J., Kim, S. A Comparative Study of Wi-Fi 6 and Wi-Fi 7 Technologies. *Wireless Networks and Systems*, 2024, vol. 15, no. 2, pp. 73–90. URL: https://doi.org/10.1016/j.wns.2024.02.007

6. Malik, A., Robinson, G. Frequency Allocation in Wi-Fi Networks: 2.4 GHz vs. 5 GHz vs. 6 GHz. *Network Spectrum Analysis*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 55–72. URL: https://doi.org/10.1080/nsa.2022.004

7. Nguyen, T., Tran, D. Wi-Fi in Smart Cities: Challenges and Opportunities. *Smart Infrastructure and Systems*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 88–104. URL: https://doi.org/10.1007/smartinfra.2023.003

8. Patel, R., Singh, M. OFDMA in Wi-Fi 6 for Enhanced Performance. *Advanced Wireless Technology Journal*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 22–39. URL: https://doi.org/10.1177/awtj.2022.001

9. Roberts, C., Evans, D. Energy Efficiency in Modern Wi-Fi Networks. *Green Wireless Communications*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 10–28. URL: https://doi.org/10.1021/gwc.2024.001

10. Smith, K., Clark, B. QoS Improvements in Wi-Fi 6 and Wi-Fi 7. *Wireless Systems Research*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 32–47. URL: https://doi.org/10.1016/wsr.2023.02.004

11. Thomas, A., Lewis, E. Implementation of MU-MIMO in Wi-Fi 6. *IEEE Access*, 2022, vol. 11, pp. 150–165. URL: https://doi.org/10.1109/ieeeaccess.2022.001

12. White, P., Taylor, J. Security Protocols for Next-Generation Wi-Fi Networks. *Cybersecurity and Wireless Networks*, 2024, vol. 13, no. 1, pp. 101–119. URL: https://doi.org/10.1109/cyberwifi.2024.001

13. Wilson, R., Chen, X. Mesh Networking with Wi-Fi 6: Enhancing Connectivity. *Wireless Networking Advances*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 62–79. URL: https://doi.org/10.1016/wna.2023.03.005

14. Xu, Y., Wang, H. Latency Reduction Techniques in Wi-Fi Networks. *Wireless Communications Journal*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 41–58. URL: https://doi.org/10.1049/wcj.2022.002

15. Zhao, F., Li, Q. Impact of 6 GHz Band on Wi-Fi Performance. *Journal of Network Performance and Optimization*, 2023, vol. 9, no. 4, pp. 25–42. URL: https://doi.org/10.1109/jnpo.2023.004

16. Johnson, P., Nguyen, M. Integration of MESH Networks in Modern Wi-Fi Systems. *Journal of Wireless Research*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 15–29. URL: https://doi.org/10.1016/jwr.2023.001

17. Chen, X., Zhao, L. Self-Organizing MESH Networks: Enhancing Wi-Fi Performance. *Wireless Technology Advances*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 45–62. URL: https://doi.org/10.1109/wta.2022.003

18. Smith, R., Wilson, D. MESH Routing Protocols for High-Density Wi-Fi. *Network Innovations*, 2024, vol. 20, no. 4, pp. 72–89. URL: https://doi.org/10.1049/ni.2024.004

19. Garcia, H., Evans, T. Dynamic Spectrum Allocation in MESH Wi-Fi Networks. *Spectrum Management Journal*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 28–40. URL: https://doi.org/10.1177/smj.2023.002

20. Malik, T., Lewis, F. Advanced Load Balancing in Wi-Fi MESH Networks. *Wireless Infrastructure*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 33–48. URL: https://doi.org/10.1007/wi.2022.001

21. Roberts, K., Lee, J. Improving Reliability in MESH Wi-Fi Systems. *Journal of Communication Systems*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 50–65. URL: https://doi.org/10.1016/jcs.2023.001

22. Nguyen, H., Tran, V. Hybrid Approaches in MESH Wi-Fi Networks. *Advanced Network Solutions*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 58–75. URL: https://doi.org/10.1049/ans.2024.002

23. Brown, S., White, G. Energy-Aware MESH Network Design for Wi-Fi. *Green Wireless Systems*, 2022, vol. 11, no. 3, pp. 20–35. URL: https://doi.org/10.1109/gws.2022.003

24. Patel, M., Singh, T. Enhancing Throughput in MESH Wi-Fi Using OFDMA. *Wireless Performance Studies*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 62–79. URL: https://doi.org/10.1109/wps.2023.004

25. Taylor, A., Roberts, L. Low-Latency MESH Networks for Industrial Wi-Fi. *Industrial Wireless Networks*, 2024, vol. 13, no. 2, pp. 34–50. URL: https://doi.org/10.1007/iwn.2024.002

26. Wilson, D., Zhang, F. Distributed MESH Wi-Fi Systems: Challenges and Opportunities. *Wireless Systems Review*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 18–32. URL: https://doi.org/10.1016/wsr.2022.001

27. Evans, C., Zhao, Y. Self-Healing MESH Networks for Enhanced Wi-Fi Coverage. *Wireless Network Engineering Journal*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 45–60. URL: https://doi.org/10.1049/wnej.2023.003

28. Zhang, L., Lee, H. QoS Optimization in MESH Wi-Fi Deployments. *Journal of Wireless Optimization*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 29–46. URL: https://doi.org/10.1109/jwo.2024.002

29. Zhao, T., Chen, Q. MESH Networking for Smart Homes: Performance Insights. *Smart Home Systems Journal*, 2022, vol. 9, no. 4, pp. 39–54. URL: https://doi.org/10.1049/shsj.2022.004

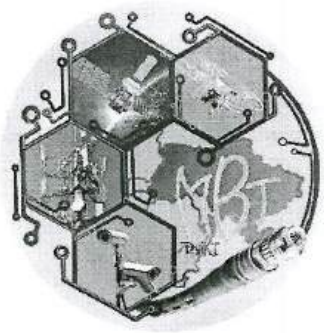
30. Lee, S., Kim, Y. Multi-Hop Communication in Wi-Fi MESH Networks. *Network Performance and Scalability*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 22–37. URL: https://doi.org/10.1016/nps.2023.001

31. Johnson, P., Nguyen, M. Integration of MESH Networks in Modern Wi-Fi Systems. *Journal of Wireless Research*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 15–29. URL: https://doi.org/10.1016/jwr.2023.001

32. Chen, X., Zhao, L. Self-Organizing MESH Networks: Enhancing Wi-Fi Performance. *Wireless Technology Advances*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 45–62. URL: https://doi.org/10.1109/wta.2022.003

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Презентація по магістерській роботі
на тему:

Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах

Виконав: Андрій СОЛОГУБ

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО,
д.т.н., професор

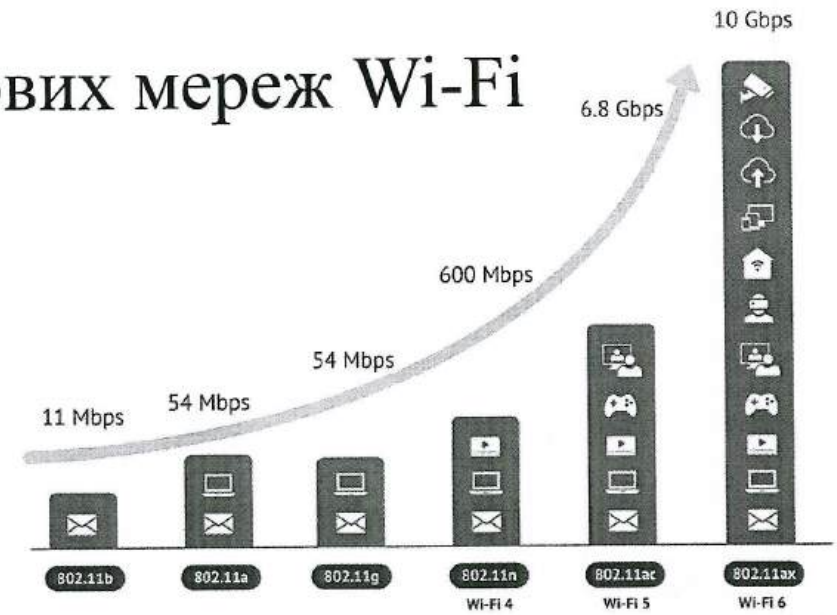
Мета роботи

Метою роботи є дослідження методів збільшення пропускної здатності мереж мобільного зв'язку на основі емпіричних моделей.

Об’єктом дослідження є процес передачі даних в мережах 4G і 5G.

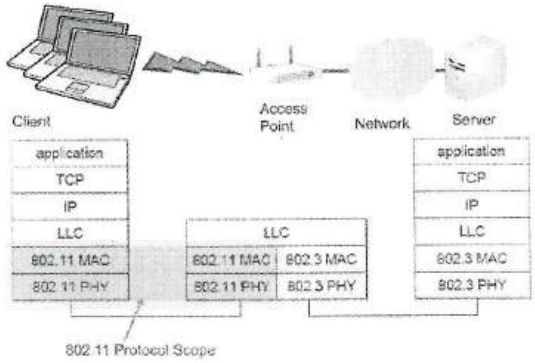
Предметом дослідження є методи збільшення пропускної здатності мереж мобільного зв'язку на основі оптимізації частотного спектра.

Еволюція безпроводових мереж Wi-Fi



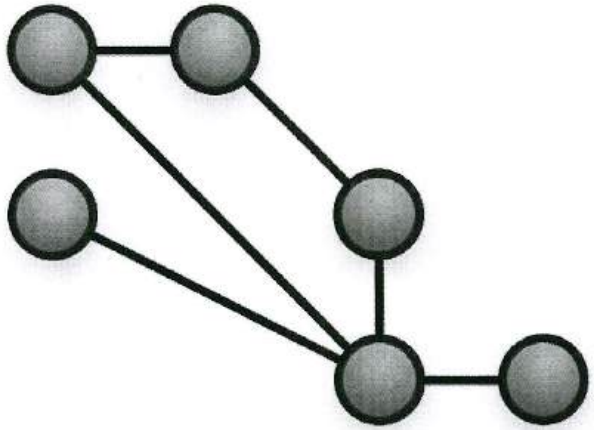
Технологія	Рік впровадження	Частотні діапазони	Максимальна швидкість	Ширина каналу	Ключові характеристики
Wi-Fi 1 (802.11b)	1999	2.4 GHz	11 Mbps	20 MHz	Базове з'єднання, низька швидкість
Wi-Fi 2 (802.11a)	1999	5 GHz	54 Mbps	20 MHz	Вища швидкість, підтримка 5 ГГц
Wi-Fi 3 (802.11g)	2003	2.4 GHz	54 Mbps	20 MHz	Сумісність з 802.11b, покращена швидкість
Wi-Fi 4 (802.11n)	2009	2.4 GHz, 5 GHz	600 Mbps	20, 40 MHz	MIMO, зворотна сумісність
Wi-Fi 5 (802.11ac)	2014	5 GHz	3.5 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	MU-MIMO, формування променя
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2019	2.4 GHz, 5 GHz	9.6 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	OFDMA, TWT, краща ефективність
Wi-Fi 6E (802.11ax with 6 GHz)	2020	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	9.6 Gbps	20, 40, 80, 160 MHz	Розширений спектр, менша затримка
Wi-Fi 7 (802.11be)	2024	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	46 Gbps	320 MHz	Надзвичайно висока пропускна здатність, розширена ефективність

Технології, що застосовуються у Wi-Fi на рівні моделі OSI



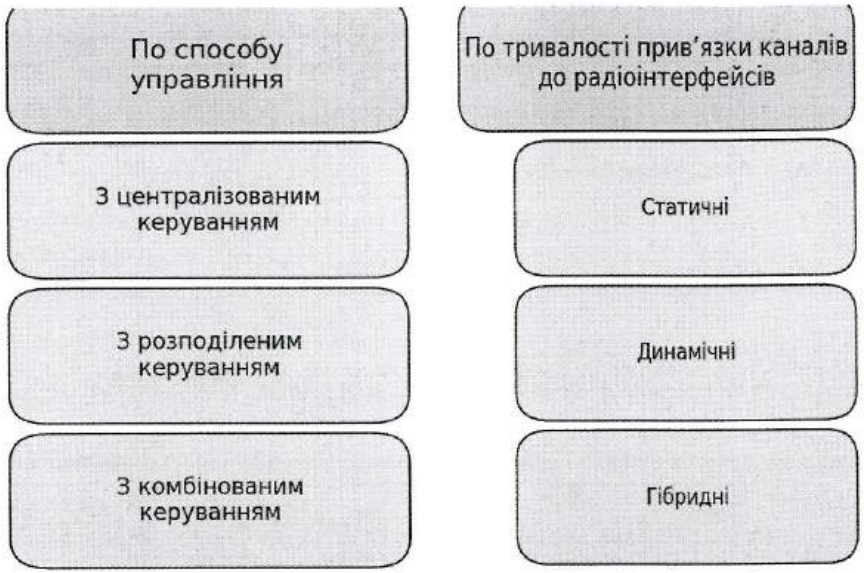
Рівень OSI	Технології	Числові характеристики
Фізичний рівень	DSSS, OFDM, OFDMA, QAM до 4096-QAM, частоти: 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz, MIMO, MU-MIMO, Beamforming, ширина каналу до 320 MHz	Швидкість до 46 Gbps, ширина каналу до 320 MHz, модуляція 4096-QAM
Канальний рівень	CSMA/CA, TWT, A-MPDU, A-MSDU, WPA2, WPA3, AES, IEEE 802.11r/k/v	Енергоспоживання оптимізоване (TWT), високий рівень безпеки (AES, WPA3)
Мережевий рівень	Mesh Routing Protocol (IEEE 802.11s), Self-Healing, Self-Organizing Networks, WMM	Підтримка QoS для відео/голосу
Транспортний рівень	TCP/UDP для передачі даних	Швидкість залежить від протоколів: TCP/UDP
Сеансовий рівень	IEEE 802.11e, Wi-Fi Direct	Оптимізація сесій для мультимедіа
Представницький рівень	Технології стиснення даних для відео та аудіо	Стиснення забезпечує оптимальне використання трафіку
Прикладний рівень	VoWi-Fi, Wi-Fi Calling, IoT-додатки	VoWi-Fi: зменшення витрат трафіку на голосові дзвінки

Характеристика MESH-мереж



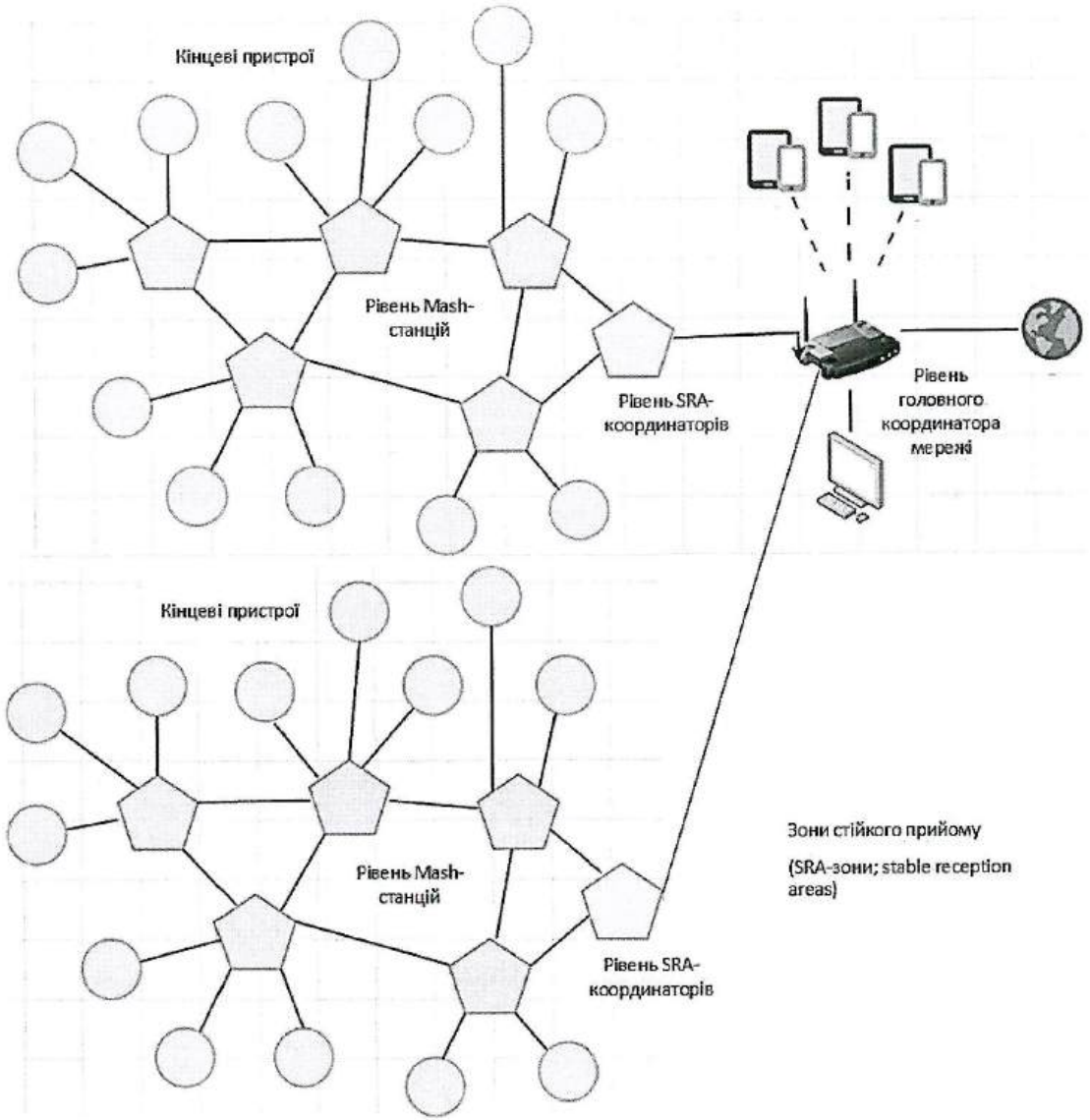
№	Пункт	Опис
1	Самовідновлення	У разі виходу з ладу одного вузла дані автоматично перенаправляються через інші вузли.
2	Розширення покриття	Легко масштабуються шляхом додавання нових вузлів, забезпечуючи більше покриття.
3	Ефективність	Забезпечують рівномірний розподіл трафіку та оптимальне використання каналів.
4	Сфера застосування	Використовуються у смарт-містах, офісах, на виробничих об'єктах для стабільного зв’язку.

Класифікація методів розподілення каналів у mesh-мережах

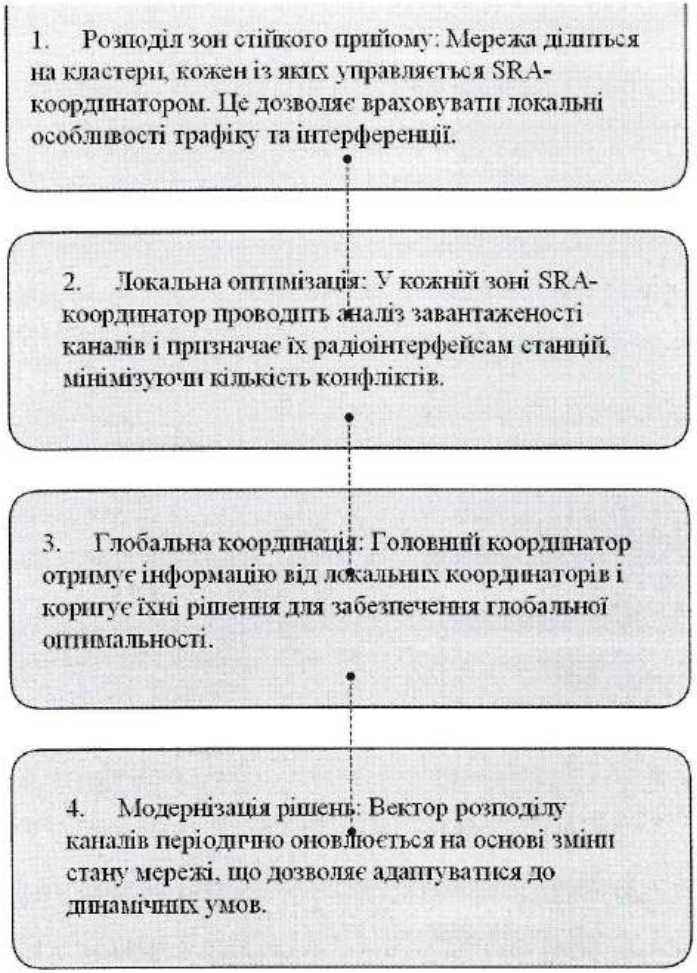


Метод	Стабільність	Динамічність	Складність управління	Сфера застосування
Централізоване	Висока	Низька	Висока	Стабільні мережі
Розподілене	Середня	Висока	Низька	Тимчасові мобільні мережі
Комбіноване	Висока	Середня	Середня	Балансування кластера у невеликих мережах

Ієрархічний метод розподілу каналів

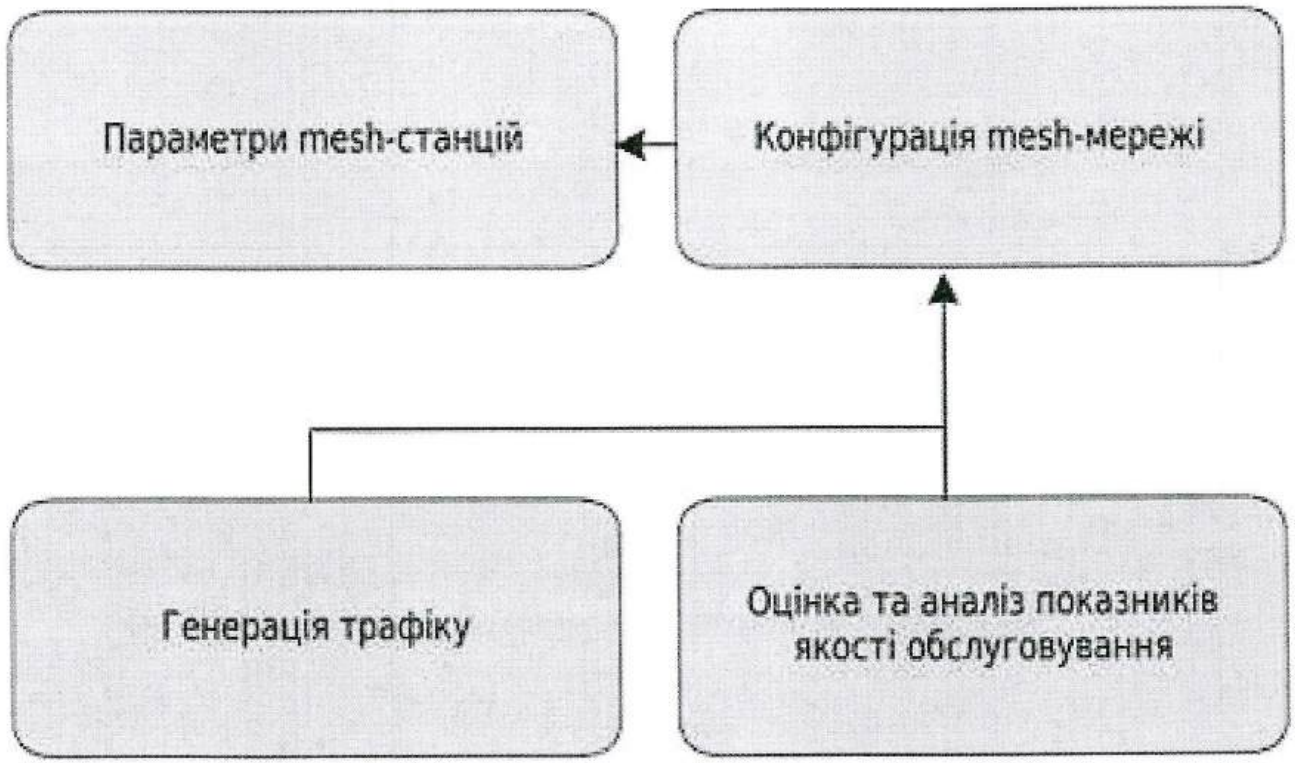


Етапи роботи методу

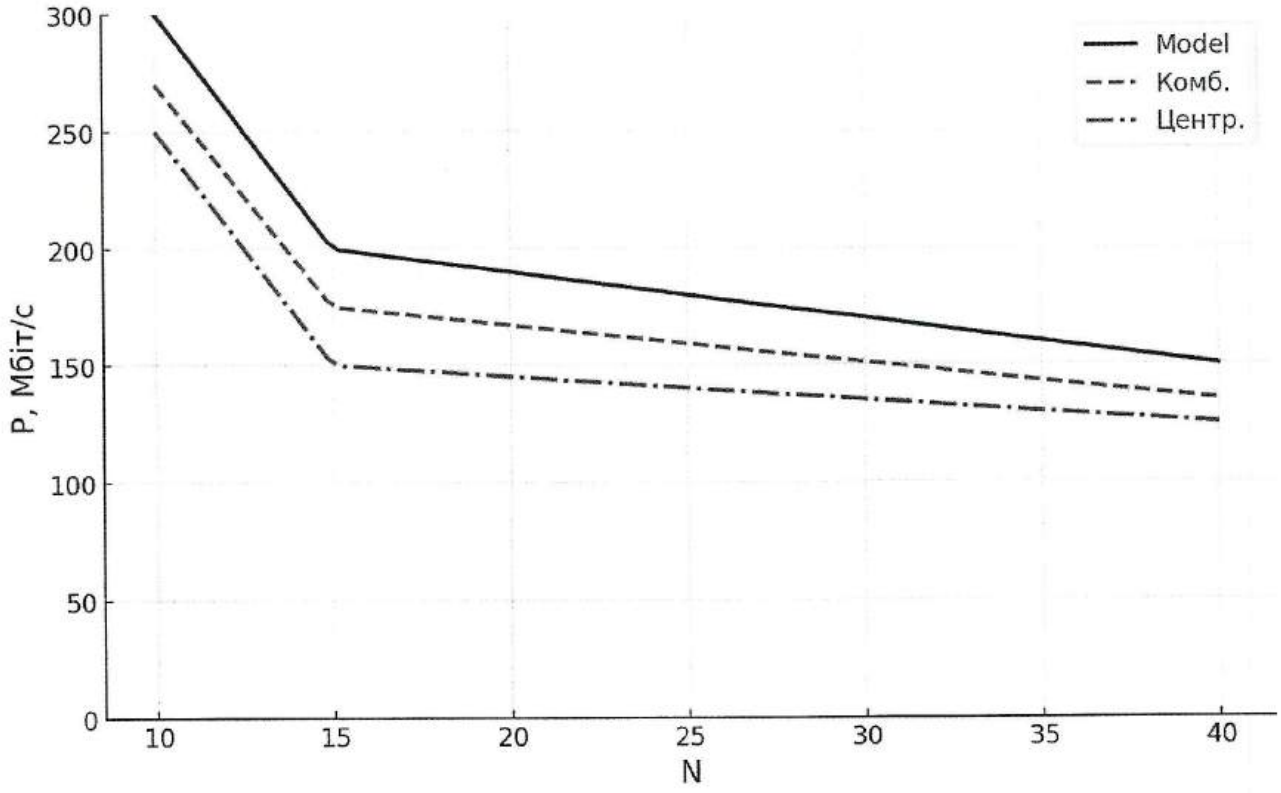


Назва принципу	Опис
Багаторівнева структура управління	Мережа ділиться на зони стійкого прийому (SRA-зони), у кожній з яких призначається локальний координатор (SRA-координатор). На вищому рівні управління знаходиться головний координатор, який забезпечує узгодження між зонами.
Декомпозиція задачі	Завдання розподілу каналів розбивається на підзадачі для кожної зони, що дозволяє вирішувати їх незалежно. Це значно зменшує обчислювальну складність, оскільки кожна зона оптимізується окремо.
Оптимізація використання каналів	Алгоритм використовує умови мінімізації інтерференції між зонами та оптимальне закріплення каналів за радіоінтерфейсами станцій. При цьому застосовуються методи математичного моделювання, такі як лагранжеві множники.
Координація між рівнями	Головний координатор відповідає за узгодження рішень, отриманих на локальних рівнях, забезпечуючи зв'язність та уніфікацію управління між різними зонами.

Структурна схема імітаційної моделі, розробленої для дослідження методу ієрархічної координації



Результати моделювання ефективності методу ієрархічної координації: залежність продуктивності (P) мережі від кількості mesh-станцій (N)



Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі досліджено еволюцію технології Wi-Fi та розвиток стандартів, що вплинули на продуктивність і ефективність мереж. Охарактеризовано ключові переваги кожного покоління, зокрема збільшення швидкості, зниження затримок і розширення частотних діапазонів. Розглянуто роль кожного рівня моделі OSI у забезпеченні стабільності та безпеки Wi-Fi-мереж, із акцентом на фізичний і канальний рівні. Підсумовано, що оптимальний розподіл частотних ресурсів зменшує інтерференцію й підвищує якість обслуговування.

У другому розділі запропоновано методи підвищення продуктивності Wi-Fi-мереж, зокрема використання алгоритмів маршрутизації (Dijkstra, OLSR, RIP) для зменшення затримок і балансування навантаження. Досліджено переваги MESH-мереж, які забезпечують самовідновлювану структуру, покращують пропускну здатність і стабільність з'єднань у складних умовах.

У третьому розділі досліджено централізоване, розподілене й комбіноване керування Wi-Fi-мережами. Запропоновано ієрархічний метод розподілу каналів для зменшення інтерференції та підвищення продуктивності. Модель, створена в NS3, оцінює ефективність ієрархічного методу, зокрема розподіл зон стабільного прийому та координацію між рівнями. Результати моделювання підтвердили, що запропонований підхід підвищує пропускну здатність на 15–30%, знижує затримки й забезпечує стабільність мережі навіть за умов динамічних змін.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Андрій СОЛОГУБ

Назва: Метод підвищення ефективності використання ієрархічних методів розподілення каналів в багатоканальних MESH-мережах

Координатор: Анатолій МАКАРЕНКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:1.1

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 1

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*