

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 –Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi»

КвРКІ. 2303209.23.03.17 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-3



Валентин СТАРУШОК

Підпис

Ім'я, прізвище

Керівник канд. техн. наук, доцент
Науковий ступінь, вчене звання



Дмитро МЕДЗАТИЙ

Підпис

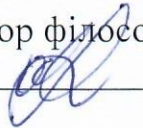
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент

Ольга ПАВЛОВА

29 04 2025 р.



Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА



“ 01 ” 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Валентин СТАРУШОК

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Керівник проекту (роботи) Дмитро МЕДЗАТИЙ, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Аналіз відомих методів координації точок доступу в мережах WI-FI




Модель координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Моделювання та дослідження координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Реалізація комунікації в схемі координації точок доступу в мережах Wi-Fi

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагиат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

Студент


Підпис

Валентин СТАРУШОК

Ім'я, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Дмитро МЕДЗАТИЙ

Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: «Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi»

Автор роботи: Старушок Валентин Сергійович

Керівник роботи: Медзатий Д.М.

Пояснювальна записка: 71 с., 3 рис., 4 дод., 81 джерело.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: протокол, мережа, канал, точка доступу.

Об'єктом дослідження є процес координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Предметом дослідження є методи та засоби координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є покращення ефективності координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися теорія множин, методи кластеризації, теорія комп'ютерних мереж.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах, особливістю якого є групування точок доступу в кластери з врахуванням перекриття ними областей території, врахування завантаженості каналів, пропускної здатності каналів та черг до каналів, який дав змогу розробити систему, в якій оптимізовано роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

На основі проведених досліджень розроблено метод та алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні алгоритмів координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо схем координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У другому розділі здійснено дослідження предметної області та розроблено модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У третьому розділі розроблено алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У четвертому розділі здійснено розроблення методу координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI	8
1.1 Огляд та поняття про координацію точок доступу в мережах Wi-Fi	8
1.2 Методи координації точок доступу Wi-Fi в комп'ютерних мережах.....	13
1.3 Постановка задачі.....	21
1.4 Висновки до першого розділу.....	21
2 МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI	22
2.1 Розроблення концептуальної схеми для удосконалення координації точок доступу в мережах Wi-Fi	22
2.2 Модель координації точок доступу у мережах Wi-Fi на основі самоорганізації.....	29
2.3 Оптимізація при здійсненні вибору каналу Wi-Fi	38
2.4 Висновки до другого розділу	43
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI	45
3.1 Кластеризація в системі координації точок доступу в мережах Wi-Fi	45
3.2 Алгоритм координації кількох точок доступу в мережі	50
3.3 Висновки до третього розділу.....	61
4 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМУНІКАЦІЇ В СХЕМІ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI	62
4.1 Протоколи комунікації в схемі координації точок доступу в мережах Wi-Fi.....	62

4.2 Система комутації пакетів	69
4.3 Метод координації точок доступу в мережі Wi-Fi	75
4.4 Висновки до четвертого розділу	76
ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	79
ДОДАТОК А Презентація роботи	87
ДОДАТОК Б Наукова праця здобувача.....	92
ДОДАТОК В Результати перевірки на плагіат.....	98
ДОДАТОК Г Програмний код для комунікації між пристроями IoT з використанням захищеного протоколу	99

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

IoT	Інтернет речей
IIoT	Індустріальний інтернет речей
IPv6	Шоста версія інтернет протоколу
IT	Інформаційні технології
Wi-Fi	Технологія бездротового зв'язку

ВСТУП

Розвиток Wi-Fi технологій пройшов кілька важливих етапів, забезпечуючи швидше з'єднання, більшу надійність і розширену функціональність, однак цей процес супроводжується низкою проблем, які потребують вирішення. Впровадження Wi-Fi 6E із використанням застосункового діапазону частот 6 ГГц стало значущим кроком, спрямованим на подолання перевантаження традиційних частот 2,4 ГГц і 5 ГГц, але залишається питанням забезпечення стабільності зв'язку та мінімізації затримок у середовищах із високою щільністю підключень. Подальший розвиток, представлений Wi-Fi 7 (802.11be), обіцяє швидкості понад 30 Гбіт/с та ефективніше управління трафіком для технологій AR/VR, потокового 8K-відео та індустріального інтернету речей (IIoT), але викликає занепокоєння стосовно сумісності старого обладнання та економічної доцільності впровадження. Значною проблемою залишається організація кластеризації точок доступу, ефективної комунікації між ними та управління трафіком у таких кластерах. Тому дослідження спрямовані на вирішення цих викликів, зокрема на покращення швидкодії точок доступу і оптимізацію взаємодії між ними як у межах одного кластера, так і між різними кластерами, що є критично важливим для досягнення високої продуктивності сучасних бездротових мереж.

Актуальність роботи полягає в розробці методу координації точок доступу у Wi-Fi мережах на основі їх кластеризації.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є покращення ефективності координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи забезпечення розподілу каналів та багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу в комп'ютерних мережах;

- розробити метод координації точок доступу у Wi-Fi мережах;

- розробити модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації;

- розробити алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.

Об'єктом дослідження є процес координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Предметом дослідження є методи та засоби координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах, особливістю якого є групування точок доступу в кластери з врахуванням перекриття ними областей території, врахування завантаженості каналів, пропускної здатності каналів та черг до каналів, який дав змогу розробити систему, в якій оптимізовано роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

На основі проведених досліджень розроблено метод та алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні алгоритмів координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися теорія множин, методи кластеризації, теорія комп'ютерних мереж.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [81] у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». (Хмельницький – 2024. – С. 477-481).

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI

1.1 Огляд та поняття про координацію точок доступу в мережах Wi-Fi

Розвиток Wi-Fi технологій [1] пройшов кілька важливих етапів, забезпечуючи швидше з'єднання, більшу надійність і розширену функціональність.

Wi-Fi 6E [2, 3] розширив можливості Wi-Fi 6 за рахунок використання застосункового діапазону частот 6 ГГц, що дозволяє уникати перевантаження на традиційних частотах 2,4 ГГц та 5 ГГц. Це підвищує швидкість та зменшує затримки в мережах з високим навантаженням. Wi-Fi 7 (802.11be) — майбутнє. Wi-Fi 7 (проект 802.11be), який наразі активно розробляється, обіцяє ще більше підвищити швидкість і ефективність. Очікується, що Wi-Fi 7 дозволить досягти швидкостей понад 30 Гбіт/с і запропонує ще більш ефективне управління трафіком для новітніх технологій, таких як AR/VR, потокове 8K-відео та індустріальні інтернет-речей (IIoT).

Отже, Wi-Fi [4, 5] постійно розвивається, щоб відповідати зростаючим вимогам щодо швидкості, надійності та масштабу підключень у сучасному цифровому світі. З кожним новим стандартом покращуються не тільки технічні характеристики, але й зручність використання у складних та насичених мережах.

Важливим напрямом дослідження [6, 7] використання технології Wi-Fi є напрям кластеризації точок доступу і комунікації між ними в цих кластерах і між кластерами.

Тому, метою роботи є покращення швидкодії з точок доступу і комунікації між ними в кластерах і між кластерами.

Кластери вузлів точок доступу Wi-Fi — це мережеві структури [8, 9], що об'єднують кілька точок доступу (AP — Access Points) для забезпечення більшої зони покриття та оптимізації розподілу трафіку в Wi-Fi мережах. Це особливо корисно для великих або густонаселених просторів, де одна точка доступу не може забезпечити стабільне з'єднання для всіх пристроїв.

Основні характеристики кластерів вузлів Wi-Fi [10]:

- 1) розширене покриття;
- 2) балансування навантаження;

- 3) швидке роумінг-перемикання;
- 4) централізоване управління;
- 5) можливості масштабування.

Розглянемо детальніше ці характеристики [11, 12].

Розширене покриття. Кластери дозволяють покрити більшу територію, використовуючи кілька точок доступу, розташованих в різних частинах приміщення або території. Це мінімізує "мертві зони", забезпечуючи надійне з'єднання у всіх куточках.

Балансування навантаження. У великих мережах кожна точка доступу може одночасно обслуговувати обмежену кількість пристроїв. Кластери точок доступу забезпечують рівномірний розподіл пристроїв між різними AP, запобігаючи перевантаженню однієї точки. Це покращує якість з'єднання, особливо в умовах високої щільності користувачів.

Швидке роумінг-перемикання. У кластерній Wi-Fi мережі роумінг між точками доступу може відбуватися безшовно. Це означає, що коли користувач переміщується між зонами покриття різних точок доступу, його пристрій автоматично підключається до найближчої точки без розриву з'єднання.

Централізоване управління. Кластери вузлів Wi-Fi можуть управлятися централізовано через спеціальні контролери або програмне забезпечення. Це дозволяє адміністраторам мережі ефективно керувати точками доступу, налаштовувати політики безпеки, оптимізувати розподіл трафіку і стежити за станом всієї мережі.

Можливості масштабування. Однією з ключових переваг кластерів є простота масштабування мережі. При потребі можна додати нові точки доступу до кластеру, щоб забезпечити більше підключень або розширити зону покриття без значної перебудови мережі.

Розглянемо технології для побудови кластерів вузлів [14].

Mesh Wi-Fi - це технологія, що дозволяє точкам доступу утворювати "мережу" (mesh), де кожен вузол може безпосередньо спілкуватися з іншими вузлами, забезпечуючи більш стабільне з'єднання. У таких системах кожен пристрій у кластері

може передавати дані через інших учасників мережі, що підвищує надійність і знижує затримки.

Контролери [15, 16] Wi-Fi використовуються для великих корпоративних мереж. Часто використовуються контролери, які управляють усіма точками доступу в кластері. Контролери можуть бути апаратними або програмними рішеннями, які відповідають за налаштування, моніторинг та управління трафіком.

Використання кластерів точок доступу може бути в корпоративних мережах, публічних просторах, розумних містах.

Корпоративні мережі [17, 18] можуть бути застосовані в офісах і бізнес-центрах. Кластери використовуються для забезпечення безперервного доступу до мережі з безшовним роумінгом.

У торгових центрах, стадіонах, аеропортах та інших місцях із великою кількістю людей кластери точок доступу забезпечують надійне з'єднання для сотень чи тисяч користувачів.

В інфраструктурах розумних міст кластери вузлів використовуються для забезпечення інтернету для камер спостереження, сенсорів і громадських Wi-Fi мереж.

Кластери вузлів точок доступу є основою для побудови сучасних бездротових мереж, що забезпечують гнучкість, надійність та високу продуктивність з'єднань навіть у складних умовах.

У кластерах Wi-Fi використовуються протоколи маршрутизації для ефективного керування трафіком між точками доступу та забезпечення безперервного з'єднання. Основні протоколи, що застосовуються в таких системах [19, 20]:

- 1) HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol);
- 2) OLSR (Optimized Link State Routing Protocol);
- 3) AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing);
- 4) B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking);
- 5) DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing);
- 6) IEEE 802.11s і Mesh-маршрутизація.

HWMP — це комбінований протокол маршрутизації, розроблений для Wi-Fi Mesh мереж. Він є стандартом для 802.11s, а це розширення Wi-Fi для побудови Mesh мереж, де точки доступу утворюють динамічну мережу з багатьма маршрутами. HWMP поєднує елементи протоколів реактивної маршрутизації (наприклад, AODV) і проактивної маршрутизації.

Реактивна маршрутизація використовується для знаходження маршрутів тільки тоді, коли з'являється необхідність передати дані.

Проактивна маршрутизація регулярно оновлює таблиці маршрутів для забезпечення швидкого доступу до маршрутів.

OLSR — це проактивний протокол маршрутизації, що використовується в багатьох бездротових мережах, зокрема Mesh-мережах. Він працює на основі алгоритмів стану каналу, що дозволяє вузлам обмінюватися інформацією про мережеву топологію. OLSR. Постійно підтримує актуальну таблицю маршрутів у кожному вузлі. Використовує "багатоточкові ретранслятори" (MPR), що дозволяють мінімізувати обсяг даних, які передаються при обміні інформацією про маршрути.

AODV — це реактивний протокол маршрутизації, що використовується в Mesh Wi-Fi мережах. Він будує маршрути лише за необхідністю, коли потрібно передати дані, що дозволяє уникати зайвого навантаження на мережу. AODV має кілька важливих характеристик: не підтримує постійні таблиці маршрутів, а створює їх "на вимогу"; використовує механізм широкомовного запиту, щоб знаходити маршрути до вузлів.

В.А.Т.М.А.Н. — це протокол маршрутизації, розроблений для мобільних мереж, який також використовується в Wi-Fi Mesh мережах. Він працює на основі децентралізованого підходу: кожен вузол визначає лише найкращий наступний вузол, через який можна передати дані; таблиці маршрутизації ускладнені мінімально, що робить В.А.Т.М.А.Н. легким і швидким для використання в динамічних мережах.

DSDV — це проактивний протокол для мереж, який підтримує постійно оновлені таблиці маршрутизації. Він використовує маршрути на основі метрик відстані, але з додаванням сортування послідовності для забезпечення актуальності маршрутів і уникнення петель.

Стандарт 802.11s визначає [21, 22] специфікацію для створення Mesh мереж Wi-Fi, де кілька точок доступу можуть динамічно об'єднуватися в кластер для розширення зони покриття. Маршрутизація у таких мережах базується на HWMP або інших протоколах, що підтримують динамічні топології і мають можливість автоматично відновлювати з'єднання у разі змін у мережі.

Схема на рис. 1.1 ілюструє, як кілька точок доступу формують Mesh-мережу, де кожен вузол підключений до інших і забезпечує передачу даних між пристроями. Протоколи маршрутизації, такі як HWMP або OLSR, допомагають керувати трафіком, оптимізуючи шляхи з'єднання.



Рис. 1 - Графічна схему маршрутизації в кластерах точок доступу Wi-Fi.

Отже, протоколи маршрутизації [23, 24], такі як HWMP, OLSR, AODV, B.A.T.M.A.N. та DSDV, дозволяють ефективно організовувати передачу даних між точками доступу в кластерах Wi-Fi, оптимізуючи маршрути та підвищуючи стабільність роботи мережі. Кожен із цих протоколів має свої сильні сторони, і вибір залежить від конкретних вимог до мережі, таких як динамічність, навантаження і

необхідність підтримки реального часу.

Таким чином, для забезпечення розширене покриття, балансування навантаження, швидкого роумінг-перемикання, централізованого управління, та можливості масштабування потрібно забезпечити реалізацію координації точок доступу Wi-Fi в комп'ютерних мережах.

1.2 Методи координації точок доступу Wi-Fi в комп'ютерних мережах

З моменту свого розгортання в 1997 році Wi-Fi став найпопулярнішою бездротовою технологією, яка використовується для передачі даних. Wi-Fi забезпечує еволюцію послуг, які пропонує технологія Wi-Fi. На Wi-Fi припадає понад 50 відсотків передачі даних. Такий успіх обумовлений постійною еволюцією стандарту Wi-Fi. Незважаючи на те, що звичайний користувач не знає про оновлення стандартів Wi-Fi в основному через складне найменування, проте кожен стандарт Wi-Fi пропонує життєво важливі функції для покращення користувацького досвіду. Завдяки зусиллям як академічних, так і галузевих дослідників, щодо Wi-Fi можна відзначити поліпшення номінальної швидкості передачі даних, яка зросла з 2 Мбіт/с у першому стандарті, 802.11-1997, до 10 Гбіт/с у новітньому 802.11ax [25]. Це значне поліпшення продуктивності пояснюється численними вдосконаленнями та доповненнями до технології Wi-Fi, такими як швидші схеми модуляції та кодування, багатовихідний та висхідний та низхідний кілька входів, ширші канали та схеми доступу до каналів [26]. Крім того, Wi-Fi включає в себе більше застосунків. Наприклад, Wi-Fi HaLow (802.11ah) [27] представляє Wi-Fi на ринку бездротового IoT. Також Wi-Fi міліметрового діапазону (802.11ad/ay) [28] забезпечує номінальну швидкість передачі даних до 275 Гбіт/с за рахунок дуже обмеженого діапазону через роботу в діапазоні міліметрових хвиль. Нові програми Wi-Fi, такі як потокове відео 8K, віртуальна реальність, доповнена реальність, онлайн-ігри, віддалені комунікації та хмарні обчислення, вимагають надзвичайно високої пропускної здатності, надійності та низької затримки. Щоб задовольнити нові вимоги до застосунків, у травні 2019 року було розпочато стандартизацію рівнів контролю доступу до середовища та фізичного

продуктів Wi-Fi, та нової поправки до стандарту Wi-Fi 802.11be, який також називають Wi-Fi 7. За прогнозами [28, 29], Wi-Fi 7 збільшить пропускну здатність на рівні MAC до більш ніж 40 Гбіт/с на частотах нижче 7 ГГц і забезпечить підтримку застосунків в реальному часі [30]. Ці досягнення стали можливими завдяки численним великим інноваціям на фізичному рівні, рівні MAC і багатоканальній роботі, таким як 4K-QAM, багатокористувацький багатокористувацький багатокористувацький вхід, кілька виходів, канали 320 МГц, покращений множинний доступ з ортогональним частотним поділом, прокол преамбули та розподіл багаторесурсних одиниць. Крім того, очікується, що в наступні роки кількість пристроїв Wi-Fi значно зросте.

Зі збільшенням кількості пристроїв Wi-Fi та впровадженням пристроїв IoT робота Wi-Fi та управління перешкодами в неліцензованому діапазоні стали надзвичайно складним завданням, яке необхідно вирішувати належним чином [31]. Це пов'язано з тим, що неліцензований діапазон страждає від перешкод від сусідніх мереж і спільно існуючих технологій. Тому, потрібні нові методи та алгоритми вибору каналів і координації кількох точок доступу, призначені для покращення продуктивності Wi-Fi у надщільних розгортаннях. Незважаючи на нові технології та функції, запропоновані в стандарті 802.11be [3], робота Wi-Fi в обмеженому, неліцензованому діапазоні, статичне призначення каналів Wi-Fi та обмеження координації кількох точок доступу в щільних сценаріях роблять управління перешкодами надзвичайно складним, особливо з огляду на те, що щільність мереж Wi-Fi зростає і буде продовжувати зростати. У зв'язку з роботою Wi-Fi в неліцензованому діапазоні [32] і зростаючою щільністю мереж, доступність каналів для роботи не гарантується [33]. Це пов'язано з наявністю потенційних перешкод [34], таких як інші технології, такі як мікрохвильові печі або навіть інші сусідні Wi-Fi пристрої, що працюють в і без того обмеженому і перевантаженому діапазоні частот. У зв'язку з цим процес, за допомогою якого точка доступу призначає [35] канал зв'язку базовому набору послуг, є надзвичайно важливим. Це пов'язано з тим, що якщо точка доступу призначає своєму базовому каналу зі значною кількістю перешкод від сусідніх перешкод, продуктивність станцій погіршиться [36], а точка доступу не

матиме можливість своєчасно реагувати. Тому, потрібно досліджувати процедури вибору каналів [37]. Крім того, координація кількох точок доступу [38] стала надзвичайно привабливою областю досліджень в останні роки через прогнозоване збільшення розгорнутих Wi-Fi, що призводить до дублювання між різними базовими каналами. Мета алгоритмів координації [39, 40] з кількома точками доступу полягає в тому, щоб дозволити сусіднім точкам доступу, що перетинаються, ефективно ділитися обмеженими ресурсами каналу один з одним, щоб гарантувати задовільну продуктивність і покращити загальну продуктивність мережі. Як наслідок, 802.11be доповнює 802.11ax, вводячи різноманітні методи координації з декількома точками доступу з метою підвищення продуктивності в умовах щільного розгортання [3]. Для майбутнього стандарту Wi-Fi розглядається кілька схем координації з декількома точками доступу. Завдяки своїй простоті, однією з основних схем, що розглядаються, є координоване просторове повторне використання [41], яке координує передачі в просторовій області, де потужність передачі кожної сусідньої спільноканальної точки доступу регулюється таким чином, щоб перешкоди між базовими каналами були на допустимому рівні. Координація декількох апаратних схем має обмеження через свою одновимірну конструкцію, що все ще може погіршити продуктивність мережі в сценаріях, де область координації не підходить для даних умов перешкод. Тому, потрібно розробляти схеми на основі динамічного вибору [42, 43] каналів і алгоритмах координації декількох точок доступу.

Процедура вибору каналів у мережах Wi-Fi орієнтована на точку доступу [44], тобто точка доступу не покладається на прямий зворотний зв'язок під час процесу вибору. Оскільки це по суті клієнти, яких обслуговує, то їх відгуки про обраний канал повинні бути враховані, перш ніж буде зроблено вибір каналу. Ця проблема стає більш серйозною в міру збільшення кількості каналів [45], що розглядаються для роботи. У зв'язку з цим необхідний алгоритм вибору каналу, який враховує зворотний зв'язок, зберігаючи при цьому застосункові витрати на зворотний зв'язок.

Враховуючи динамічний характер неліцензованого діапазону, поточні алгоритми вибору каналів, які дозволяють точці доступу статично призначати канал для роботи у висхідному та низхідному каналах, не призводять до оптимального

призначення каналів з часом. Іншими словами, відповідний в даний час канал з допустимими перешкодами не гарантовано буде придатним в майбутньому часі передачі [46]. Отже, процес призначення каналів повинен бути динамічним і мати можливість своєчасно адаптуватися до різних умов каналу [47].

Головною метою просторового повторного використання [48] є збільшення загальної паралельної передачі. Це досягається шляхом передачі точки доступу, навіть якщо вона виявляє зайнятий канал. Це досягається шляхом підвищення порогу чіткої оцінки каналу за умови, що точка доступу регулює свою потужність передачі відповідно до виявленого рівня перешкод від сусідньої точки доступу. Незважаючи на просторове повторне використання, що покращує спектральну частоту, у деяких випадках передача з обмеженою потужністю може не забезпечити необхідне співвідношення сигнал/перешкоди до перекриваючих базового набору послуг [49]. Це пов'язано з відсутністю справжньої координації точками доступу. У 802.11be пропонується оновлення просторового повторного використання, пропонуючи координоване просторове повторне використання, де мета зміщується від простого співіснування та пом'якшення перешкод до координації. Просторова координація досягається [50] за допомогою управління потужністю передачі на основі інформації зворотного зв'язку про втрату шляху, якою обмінюються між координуючими точками доступу. Таким чином, вводиться справжня координація в процес координації з декількома точками доступу. Крім того, немає гарантії, що пов'язані з координованою точкою доступу, користувачі будуть мати мінімально необхідний канал через просторову близькість. В результаті, багатовимірні схеми координації з урахуванням ситуації, яка має можливість розгортати координацію в декількох областях, є важливою для забезпечення високого ступеня надійності [51, 52].

Таким чином, серед проблем, що виникають, у зв'язку з природою і зростаючою щільністю мереж Wi-Fi є такі: удосконалення механізму зворотного зв'язку; удосконалення механізму динамічності у виборі каналів; удосконалення координації кількох точок доступу. Для удосконалення механізму зворотного зв'язку та динамічності у виборі каналів потрібно розробити алгоритм вибору каналів, орієнтований на користувача, з низьким рівнем механізму звітності. Згідно алгоритму

повинна бути можливість призначати відповідний канал і динамічного перемикання каналу у разі, якщо раніше обраний канал вже не підходить. Механізм зворотного зв'язку, за допомогою якого підпорядковуються пристрої, повинен вимагати мінімальних застосункових витрат [53, 54]. Незважаючи на важливість механізму звітності з низькими застосунковими витратами, він не повинен погіршувати якість зворотного зв'язку, щоб просто зменшити застосункові витрати на сигналізацію. Щоб досягти цього, механізм звітності повинен використовувати просторову кореляційну природу зазначених перешкод. Таким чином, зменшуючи застосункові витрати без зниження якості інформації. Крім того, алгоритм повинен бути несприйнятливим до шуму, який може виникнути в результаті дуже коротких і тимчасових коливань стану каналу, які не повинні мати тривалого впливу на вибір каналу точки доступу [55, 56].

Для удосконалення координації кількох точок доступу [57, 58] потрібно розробити багатовимірну комбіновану схему координації з кількома точками доступу з урахуванням ситуації, яка має на меті гарантувати певний рівень продуктивності всіх каналів, що беруть участь у передачі з кількома точками доступу. Комбінована структура алгоритму повинна надавати головній контролер кількох доменів для координації.

Розглянемо координацію кількох точок доступу в стандарті 802.11ax [59, 60]. В умовах щільного розгортання група точок доступу не має змоги мати кілька каналів для вибору [61]. Тому, їм доведеться ділити один канал між собою за допомогою схем співіснування та координації кількох точок доступу. В результаті, 802.11ax для подолання цієї проблеми і покращення взаємодії з користувачами в умовах щільного розгортання, до стандарту ввели просторове повторне використання. Це схема співіснування, що дає змогу перекривати проблемні канали [62]. Незважаючи на вдосконалення залишається ще багато можливостей для вдосконалення. У зв'язку зі зростаючою щільністю мереж WLAN, 802.11be прагне зробити наступний крок, запровадивши координацію з кількома точками доступу, де мета зміщується від уникнення перешкод до координації [63]. Завдяки застосунковій координації, що призводить до ситуаційної обізнаності, кілька точок доступу можуть співпрацювати, що призводить до можливості покращення загальної продуктивності в умовах

щільного розгортання. У зв'язку зі збільшенням щільності мережі та перевантаженим неліцензованим частотним спектром, мережі WLAN страждають від перевантаження та уповільнення мережі [64, 65]. Крім того, через зростаючу щільність мереж WLAN часто можна зустріти велику кількість мереж Wi-Fi, які співіснують в одній області, що призводить до перешкод. Щоб вирішити цю проблему співіснування та адаптуватися до розгортання WLAN, стандарт IEEE 802.11ax ввів виявлення пакетів з метою пом'якшення перешкод та ефективного повторного використання частотного спектру в сценаріях щільної мережі [66]. Для досягнення цієї мети збільшується кількість паралельних трансмісій, які могли б покращити загальну пропускну здатність. Щоб збільшити кількість паралельних передач, він дозволяє точці доступу опускати поріг чіткої оцінки каналу/відчуття носія для вищого порогу. Це призводить до паралельних передач у сценаріях, де в іншому випадку канал був би визначений як зайнятий. З іншої сторони, встановивши відповідне значення для порогу, обидві точки доступу можуть передавати одночасно. В результаті поліпшується використання каналів [67]. Процес встановлення порогу не враховує положення каналу. Це пов'язано з відсутністю будь-якої справжньої координації між точками доступу. В результаті, стандарт 802.11be розширює можливості 802.11ax, вводячи координацію з декількома точками доступу. Завдяки координації кількох точок доступу точки доступу координуються не тільки для зменшення перешкод, але й для оптимізації користувацького досвіду в обох випадках [68].

Координація кількох точок доступу в 802.11be вводить два типи схем координації: схеми координованих рівнів; схеми спільних рівнів. Узгоджені схеми рівнів - це схеми, в яких кожна точка доступу обслуговується не більше ніж одним каналом. Ця категорія координаційних схем включає координоване просторове повторне використання, координоване зворотнє використання та координоване формування потоку. В схемах спільного рівня кілька точок доступу спільно передають дані в один канал. До цієї категорії схем координації відноситься спільна передача. Одним з основних факторів, що дають одним схемам узгодження перевагу перед іншими є простота реалізації. Оскільки точки доступу зазвичай розгортаються без попереднього планування або дротового магістрального з'єднання між ними, то

важливо враховувати тип даних, які необхідно обмінюватися між точками доступу, щоб ініціювати координацію кількох точок доступу.

У сценаріях координації з декількома точками доступу точка доступу, яка стає основною і готова поділитися з сусідніми точками доступу, називається основною точкою доступу або спільною точкою доступу [69]. Сусідня точка доступу, яка готова до координації, називається вторинною точкою доступу. Така схема є однією з найпростіших і найлегших у впровадженні схем координації [70]. Це еволюція некоординованого просторового повторного використання стандарту 802.11ах. Тут в цій схемі просто встановлюється одна точка доступу для передачі з максимальною потужністю, тоді як інші точки доступу зменшують свою потужність передачі. Інший підхід [71] дозволяє точкам доступу координувати свої графіки в частотній області. Іншими словами, сусіднім точкам доступу можна призначити однакові права, якщо вони не заважають один одному, і різні права доступу, якщо вони це роблять. Може бути і варіант з декількома точками доступу, де точки доступу співпрацюють між собою, створюючи динамічну, складену систему, що складається з цих точок доступу. Це є найскладнішою схемою координації для реалізації та має дуже суворі вимоги. Кожна схема координації відрізняється з точки зору застосункових витрат на сигналізацію та вимог до синхронізації. Спільна передача вимагає жорсткої синхронізації фаз і часу [72]. Крім того, дані не передаються між точками доступу, оскільки кожне звернення обслуговується не більше ніж однією точкою доступу. В результаті, така схема є найскладнішою схемою координації, яка може бути реалізована. Крім того, вона вимагає декілька каналів в мережі з кількома точками доступу, що означає, що потрібні значні застосункові витрати на передачу сигналу.

Розглянемо поняття [73, 74] скоординованого просторового повторного використання. Робота з основною точкою доступу, пов'язана зі спільною/вторинною точкою доступу. Можна розбити процедуру на три основні фази: фазу підготовки; фазу оголошення; фазу передачі. Етап підготовки - це фаза перед тим, як точка доступу буде обрана як основна. На цьому етапі повинен бути виконаний набір дій: зібрати можливості координації кількох сусідніх точок доступу; прийняти рішення про список кандидатів. Фаза налаштування та запуску відбувається відразу після того,

як обрано основну точку доступу. На цьому етапі кожна точка доступу має наступний список дій: вибер спільної точки доступу з набору кандидатів у точку доступу; запуск передачі спільної точки доступу за допомогою рамки оголошення, яка вказує важливу інформацію, таку як тривалість передачі, розподіл та обмеження потужності передачі спільної точки доступу. Фаза передачі [75, 76] - це фаза відразу після того, як точки доступу отримують спільний доступ. Якщо обрана спільна точка доступу успішно отримує доступ, то вона стає спільною точкою доступу. Далі запускається передача з декількома точками доступу. Тому, така стратегія усуває один з основних недоліків SR 802.11ax, а саме: потенційне погіршення продуктивності мережі при розгортанні. Крім того, конструкція гарантує мінімальний час з'єднання для всіх пов'язаних з основною точкою доступу точок доступу. Це гарантує, що її розгортання принаймні не погіршить продуктивність системи порівняно з некоординованою системою. Незважаючи на підвищення продуктивності існує критичний недолік. Схеми координації є одновимірними [77]. Іншими словами, кожна схема координації виконує координацію тільки за одним параметром. По суті, координація за кожним параметром має обмеження, що ґрунтуються на сценаріях, де така координація була б неоптимальною і не забезпечувала б необхідного покращення продуктивності. У сценарії з декількома точками доступу і обмеженим доступним каналом, координуючий їх може не мати достатньої кількості для розподілу на кожну з них, що призведе до зниження продуктивності. У таких випадках мережа з кількома точками доступу не має іншого вибору, як погодитися з обмеженнями продуктивності.

Таким чином, поточним схемам координації [78-80] бракує багатовимірного дизайну, що призводить до того, що для спільної точки доступу полегшує координовану передачу кількох точок доступу в певній області, не розглядаючи альтернативні домени, які могли б бути більш підходящими для даного сценарію розгортання. Це призводить до того, що така схема має обмеження щодо неоптимального домену замість того, щоб вибирати більш підходящий домен. В результаті такої конструкції у таких сценаріях, коли координація лише на одному домені є неоптимальною, інтегрована, багатовимірна схема координації намагається зменшити зниження продуктивності шляхом спроб координації на кількох доменах

одночасно таким чином, щоб не допускалося обмеження одного домену.

Представлений огляд проблем з вибором каналів [39-62], а також схем координації [56-68] та співіснування кількох точок доступу [56-80]. Виділено недоліки існуючих алгоритмів підбору каналів та схем координації з декількома точками доступу. Тому, встановлено, що потребує удосконалення механізм звітності з низькими застосунковими витратами для алгоритмів розподілу каналів та багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу.

1.3 Постановка задачі

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи забезпечення розподілу каналів та багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу в комп'ютерних мережах;

- розробити метод координації точок доступу у Wi-Fi мережах;

- розробити модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації;

- розробити алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.

1.4 Висновки до першого розділу

Проаналізовано відомі методи та засоби схем координації з декількома точками доступу в комп'ютерних мережах. Для забезпечення ефективності потрібно удосконалити механізм звітності з низькими застосунковими витратами для алгоритмів розподілу каналів та багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу в мережах WI-Fi.

2 МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI

2.1 Розроблення концептуальної схеми для удосконалення координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi є важливим елементом забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж, особливо у середовищах із високою щільністю користувачів. Його мета — зменшити вплив взаємних перешкод між точками доступу (AP, Access Points) і покращити якість обслуговування. Основні методи координації можна поділити на кілька категорій:

- 1) розподіл частотних каналів;
- 2) керування потужністю передавачів;
- 3) розподіл навантаження;
- 4) використання спектру для одночасного обслуговування декількох пристроїв;
- 5) розумне керування трафіком;
- 6) синхронізація точок доступу;
- 7) використання адаптивних алгоритмів.

Розглянемо їх в контексті поєднання для покращення координації точок доступу в мережах Wi-Fi.

Для запобігання перекриттю частотних каналів сусідніх точок доступу можна здійснювати розподіл частотних каналів, використовуючи неконфліктні канали. У стандарті 802.11 (Wi-Fi) на частоті 2.4 ГГц доступно 13 каналів у Європі, але лише 3 з них (1, 6, 11) не перекриваються. На частоті 5 ГГц кількість неконфліктних каналів значно більша. Розподіл може бути автоматичним розподілом каналів точками доступу з урахуванням сигналів сусідніх пристроїв. Для цього застосовують протоколи, що враховують рівень перешкод (наприклад, спектральний аналіз).

Для мінімізації взаємних перешкод між точками доступу застосовують керування потужністю передавачів. Це досягається через динамічне зменшення потужності передавачів у зонах із високою щільністю точок доступу. Також, виконують при цьому аналіз потужності сигналів клієнтів і підлаштування параметрів. В результаті має бути зменшення рівня шуму в мережі, підвищення

швидкості передачі даних.

Для здійснення рівномірного розподілення користувачів між точками доступу реалізують розподіл навантаження. Він здійснюється на основі моніторингу кількості підключень до кожної точки доступу, примусового перемикавання користувачів на менш завантажені точки доступу, використання 802.11k/v/r для оптимізації роумінгу між точками доступу. В результаті буде зменшення затримок і підвищення пропускної здатності.

Для підвищення ефективності використання спектру для одночасного обслуговування декількох пристроїв застосовують технології MU-MIMO та Beamforming. Використання багатокористувацького MIMO (MU-MIMO) для передачі даних кільком клієнтам одночасно. Технологія Beamforming для формування вузькоспрямованого сигналу на конкретного клієнта. В результаті буде зниження впливу перешкод між клієнтами. Без Beamforming передача сигналу велася б у всіх можливих напрямках. Оскільки сигнал використовується більш ефективно, MU-MIMO допомагає збільшити дальність і швидкість Wi-Fi. Це дає змогу антені надсилати радіосигнали з одного місця в кілька певних кінцевих точок, замість того щоб передавати їх по всій території.

Оптимізація використання мережевих ресурсів може бути досягнута через розумне керування трафіком. Пріоритизація трафіку досягається за допомогою QoS (Quality of Service) та використання протоколів, таких як 802.11e, для забезпечення кращої якості мультимедійного трафіку. В результаті буде покращення користувацького досвіду для критичних застосунків (відео, VoIP).

Для мінімізації взаємних інтерференцій потрібно здійснювати синхронізацію точок доступу. Може бути використано центральний контролер для координації роботи точок доступу у корпоративних мережах та синхронізація часового доступу до середовища передачі. В результаті буде зменшення колізій у мережі.

Для автоматичної оптимізації роботи мережі використовують як правило адаптивні алгоритми, зокрема і алгоритми машинного навчання для аналізу поведінки мережі та підлаштування параметрів, самонавчання на основі історичних даних. В результаті буде постійне вдосконалення продуктивності мережі.

Застосування перелічених методів координації залежить від конкретних умов роботи мережі та її топології. У сучасних Wi-Fi мережах часто використовують комбінацію цих підходів для забезпечення найвищої ефективності.

Розроблення методу координації точок доступу в мережах Wi-Fi є складним завданням, яке включає кілька етапів.

Основні етапи такого процесу:

- 1) аналіз вимог і постановка завдання;
- 2) проєктування алгоритму координації;
- 3) формалізація алгоритму;
- 4) моделювання та симуляція;
- 5) прототипування;
- 6) оптимізація та удосконалення.

Розглянемо ці основні етапи детальніше.

При здійсненні аналізу вимог і постановки завдання потрібне визначення цілей:

- 1) зменшення взаємних перешкод;
- 2) підвищення пропускної здатності;
- 3) покращення якості обслуговування.

В процесі проведення аналізу здійснюють вивчення особливостей середовища: щільність точок доступу та користувачів; тип трафіку (мультимедіа, веб-серфінг тощо); використовуваний спектр (2.4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц). Також, обов'язково досліджують відомі методи координації, а саме: переваги й недоліки сучасних підходів; визначення недоліків у існуючих рішеннях.

Проєктування алгоритму координації розпочинатимемо з розроблення концепції, тобто визначення основних механізмів (розподіл каналів, керування потужністю, адаптивність). Далі здійснюватимемо вибір типу координації: централізована (використання контролера); децентралізована (локальна взаємодія між точками доступу). Моделювання поведінки мережі здійснюватимемо на основі визначення умов для прийняття рішень (наприклад, порогові значення потужності сигналу, кількість підключених клієнтів), розроблення схем взаємодії між точками доступу.

Формалізація алгоритму як правило базується на розробленні математичної моделі з використанням теорії графів для моделювання мережі, методів оптимізації (лінійна, нелінійна оптимізація). Формулювання критеріїв ефективності здійснюватимемо так:

- 1) мінімізація перешкод;
- 2) максимізація пропускної здатності;
- 3) забезпечення стабільності з'єднань.

Визначення параметрів адаптації: потужність передавача; канал частоти; пріоритет трафіку.

Моделювання та симуляція виконується з використанням віртуального середовища: використання спеціалізованих інструментів, таких як NS3, MATLAB, або OMNeT++. Проведення тестів так: симуляція роботи алгоритму в різних сценаріях (низька/висока щільність точок доступу, різні типи трафіку). Аналіз параметрів так: затримка; пропускна здатність; рівень перешкод. На завершення цього етапу порівнюватимемо отримані результати з результатами існуючих методів.

Прототипування полягає в реалізації алгоритму на обладнанні: налаштування точок доступу для підтримки нових механізмів; використання відкритих платформ, таких як OpenWrt. Випробування прототипу може бути здійснено так: реальні умови роботи (офіс, міське середовище, стадіон); моніторинг ефективності та надійності.

Оптимізація та доопрацювання передбачатимуть такий аналіз результатів, який полягатиме у визначенні слабких місць алгоритму. Оптимізація параметрів алгоритму (наприклад, адаптивність до динамічних змін) базується на внесенні змін. Також, потрібне тестування оновленої версії для перевірки покращених результатів.

Ці етапи забезпечують послідовний підхід до розробки, тестування та впровадження методу координації точок доступу в Wi-Fi мережах, що сприяє підвищенню їхньої продуктивності та надійності.

Розробимо концептуальні кроки алгоритму координації точок доступу у мережах Wi-Fi.

Деталізація алгоритму координації точок доступу у мережах Wi-Fi може включати кілька етапів, кожен з яких забезпечує оптимальну роботу мережі.

Узагальнений покроковий опис алгоритму координації:

- 1) збір даних;
- 2) оцінка стану мережі;
- 3) вибір оптимальної стратегії координації;
- 4) алгоритм розподілу частотних каналів;
- 5) алгоритм керування потужністю;
- 6) алгоритм балансування навантаження.

Розглянемо кожен з визначених кроків алгоритму координації точок доступу у мережах Wi-Fi детальніше.

Збір даних здійснюватимемо у операційному вимірювальному середовищі. Кожна точка доступу визначає рівень сигналу, потужність шуму та перешкоди в діапазоні каналів. Виявлення сусідніх точок доступу, що працюють на перекриваючихся каналах, є обов'язковим. Збір інформації про клієнтів включає кількість підключених пристроїв до кожної точки доступу, рівень сигналу від клієнтів до точки доступу, тип і обсяг трафіку (наприклад, VoIP, відео, HTTP). Сканування спектру включає визначення зайнятих і вільних каналів, аналіз рівня завантаження спектру.

Оцінка стану мережі здійснюється згідно таких параметрів: навантаження; перекриття; ідентифікації проблемних зон. Оцінка навантаження базується на визначенні точок доступу з перевантаженням (за кількістю клієнтів або обсягом трафіку). Оцінка перекриття базується на виявленні зон із високим рівнем взаємних перешкод між точками доступу. Ідентифікація проблемних зон здійснюватиметься згідно аналізу місць зі слабким покриттям сигналу та зони з низькою якістю обслуговування (висока затримка, низька швидкість передачі даних).

Вибір оптимальної стратегії координації залежить від поточного стану мережі, при якому алгоритм обирає одну або кілька стратегій: динамічний розподіл каналів (Dynamic Channel Assignment); керування потужністю передавачів; перерозподіл клієнтів; пріоритизація трафіку. Динамічний розподіл каналів базуватимемо на перевірці зайнятості каналів та призначенні неконфліктних каналів для сусідніх точок доступу. Керування потужністю передавачів базується на зменшенні потужності

передавача в точках доступу, які мають зони перекриття, та збільшенні потужності у зонах зі слабким сигналом. Перерозподіл клієнтів здійснюватимемо перемиканням клієнтів із перевантажених точок доступу на менш завантажені та використанні 802.11k/v/r для швидкого роумінгу. Пріоритезація трафіку здійснюватиметься призначенням пріоритетів для критично важливого трафіку (відео, VoIP) та обмеженням трафіку низького пріоритету.

Суть алгоритму розподілу частотних каналів полягає у скануванні спектра для виявлення використаних каналів, розрахунку рівня перешкод для кожного каналу, вибору каналу з мінімальним рівнем перешкод та призначення каналів так, щоб сусідні точки доступу не використовували однакові або перекриваючі канали. Розрахунок рівня перешкод для кожного каналу можна визначати так:

$$I_k = \sum_{i=1}^N P_{i,k}, \quad (2.1)$$

де I_k — рівень перешкод на каналі k ; $P_{i,k}$ — потужність сигналу сусідньої точки доступу i на каналі k .

Вимірювання рівня сигналу між точками доступу та клієнтами здійснюватимемо згідно алгоритму керування потужністю. Визначення зони перекриття сигналів між точками доступу в ньому можна здійснити так:

$$P_a = P_1 - P_2, \quad (2.2)$$

де P_a – перекриття сигналів; P_1, P_2 — рівні сигналу сусідніх точок доступу.

Також, в алгоритмі потрібно здійснити такі кроки як зменшення потужності передавача, якщо перекриття перевищує заданий поріг, та поступове збільшення потужності у зонах зі слабким сигналом.

Алгоритм балансування навантаження містить такі основні кроки:

1) визначення коефіцієнта навантаження для кожної точки доступу;

- 2) перемикання клієнтів із перевантажених точок доступу;
- 3) перевірка після балансування, чи досягнуто рівномірного розподілу.

Визначення коефіцієнта навантаження для кожної точки доступу можна обчислити так:

$$L_{td} = \frac{N_{cl}}{C_{td}}, \quad (2.3)$$

де N_{cl} — кількість клієнтів, підключених до точки доступу; C_{td} —пропускна здатність точки доступу.

Перемикання клієнтів із перевантажених точок доступу здійснюється, якщо клієнт, що має високий рівень сигналу до кількох точок доступу, перемикається на менш завантажену, або якщо є перевірка після балансування щодо досягнення рівномірного розподілу.

Адаптація до змін здійснюється після моніторингу у реальному часі, тобто при постійному відстеженні змін у мережі (нові клієнти, зміна трафіку), або при динамічній оптимізації, яка реалізується через перевизначення каналів і потужності в разі появи нових точок доступу або збільшення навантаження.

Крім основних кроків, також, важливим є виконання верифікації та оцінки ефективності розробленої схеми координації точок доступу. Для цього вимірюють ключові метрики щодо пропускної здатності мережі, затримки та швидкості передачі даних, рівня перешкод, порівняння результатів із базовими показниками. У разі необхідності здійснюють повторення оптимізації.

Цей алгоритм забезпечує інтегроване управління всіма аспектами роботи Wi-Fi мережі та дозволяє динамічно адаптуватися до змін у середовищі.

Таким чином, розроблено основні етапи для розроблення методу координації точок доступу в мережах Wi-Fi, в основі якого закладено алгоритм, що забезпечує схему координації. Розроблені етапи та алгоритм потребують деталізації в частині вибору точок для визначення їх як основних точок доступу, розподілу каналів та забезпечення ефективного доступу користувачів.

2.2 Модель координації точок доступу у мережах Wi-Fi на основі самоорганізації

Моделі координації точок доступу у мережах Wi-Fi визначають способи взаємодії між точками доступу, їхні механізми управління та взаємну оптимізацію роботи. Вони відрізняються за рівнем складності, централізованості та адаптивності. Розглянемо основні моделі координації:

- 1) централізована модель;
- 2) децентралізована (розподілена) модель;
- 3) ієрархічна модель;
- 4) координація на основі кооперативної взаємодії;
- 5) модель з використанням штучного інтелекту;
- 6) модель самоорганізації;
- 7) комбінована модель.

У централізованій моделі використовується центральний контролер, який відповідає за управління всіма точками доступу в мережі. Контролер збирає дані від точок доступу та клієнтів (наприклад, завантаженість, рівень сигналу). На основі аналізу даних контролер ухвалює рішення щодо розподілу каналів, керування потужністю та балансування навантаження. Переваги цієї моделі в оптимальній координації в масштабах всієї мережі, простому централізованому адмініструванні, можливості використання складних алгоритмів оптимізації. Недоліками є залежність від єдиного вузла (контролера), що може стати точкою відмови, затримки через необхідність передачі даних до контролера. Прикладами таких рішень є рішення від Cisco, Aruba, Ubiquiti.

Децентралізована (розподілена) модель передбачає, що в моделі кожна точка доступу функціонує незалежно, ухвалюючи локальні рішення на основі доступних даних. Точки доступу обмінюються інформацією про канали, потужність сигналу та навантаження з найближчими сусідніми точками. Рішення приймаються локально з урахуванням умов середовища. Перевагами є відсутність центрального контролера (вища стійкість до відмов), локальна адаптація до змін у середовищі. Недоліками є

менш оптимальні рішення в масштабах всієї мережі, потенційні конфлікти між сусідніми точками доступу. Прикладами є автономні точки доступу в невеликих мережах або домашніх умовах.

Ієрархічна модель поєднує елементи централізованої та децентралізованої моделей. Вона включає кілька рівнів управління: локальні контролери; глобальний контролер. Глобальний контролер керує групами точок доступу через локальні контролери. Локальні контролери виконують управління всередині своїх груп. Перевагами є баланс між централізованим управлінням та локальною автономією і висока масштабованість. Недоліками є ускладнена структура управління та потреба ретельного налаштування взаємодії між рівнями. Прикладами є використання контролерів у великих корпоративних мережах.

Координація на основі кооперативної взаємодії полягає в тому, що точки доступу співпрацюють, обмінюючись інформацією про стан мережі. Точки доступу спільно вирішують, як розподілити канали та навантаження, мінімізувати перешкоди та покращити якість обслуговування. Перевагами є покращена взаємодія між точками доступу, децентралізована, але скоординована оптимізація. Недоліками є необхідність частого обміну даними між точками доступу, підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів точок доступу. Прикладами є алгоритми динамічної оптимізації в mesh-мережах.

Модель з використанням штучного інтелекту передбачає використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для адаптації до змін у мережі. Принцип роботи згідно цієї моделі полягає у зборі великих обсягів даних про стан мережі, аналізі патернів та передбачення майбутніх змін, автоматичному налаштуванні параметрів точок доступу. Перевагами є висока адаптивність до динамічних змін у мережі, автоматичне вдосконалення алгоритмів на основі історичних даних. Недоліками є висока складність впровадження та потреба значних обчислювальних ресурсів. Прикладами є рішення з AI-оптимізацією, такі як Cisco DNA Center або Mist AI від Juniper.

Модель самоорганізації побудована з використанням особливості, коли точки доступу автоматично налаштовуються без втручання адміністратора. Використання

алгоритмів самоорганізації для налаштування частотних каналів, потужності передавачів та балансування навантаження є визначальними, які позиціонують цю модель як саме самоорганізовану. При цьому повинен бути забезпечений постійний моніторинг і коригування параметрів. Перевагами є мінімальні витрати на управління мережею, висока адаптивність до змін. Недоліками є такі: рішення можуть бути субоптимальними; ускладнене масштабування в дуже великих мережах. Прикладом є Mesh-мережі (наприклад, Google Nest Wi-Fi).

Комбінована модель поєднує особливості кількох моделей (централізованої, децентралізованої, самоорганізаційної). Принцип її роботи визначається використанням централізованого управління для критичних параметрів (наприклад, розподіл каналів) та наданням автономії точкам доступу в локальному управлінні (керування потужністю, балансування). Перевагами є гнучкість та адаптивність, оптимізація на всіх рівнях мережі. Недоліками є підвищена складність впровадження. Прикладами є великі мережі з керованими точками доступу (наприклад, мережі стадіонів, аеропортів).

Вибір моделі координації залежить від розміру мережі, типу використання та бюджету. Децентралізована модель підходить для малих мереж, централізована або комбінована — для великих. Моделі на основі штучного інтелекту чи самоорганізації підходять для динамічних середовищ. Високотехнологічні моделі (AI, SON) потребують більших інвестицій.

Виберемо в якості реалізації для методу координації точок доступу в мережі Wi-Fi модель самоорганізації. Розглянемо її детальніше. Модель самоорганізації (Self-Organizing Networks, SON) є підходом, при якому точки доступу автоматично налаштовуються, оптимізують свої параметри роботи та адаптуються до змін у мережі без потреби постійного ручного втручання адміністратора. Ця модель базується на автономній взаємодії елементів мережі з використанням алгоритмів адаптації та оптимізації. Деталізуємо основні компоненти моделі самоорганізації. Нові точки доступу автоматично налаштовують свої параметри при підключенні до мережі. Налаштовуються самостійно такі складові: частотні канали; потужність передавача; SSID та параметри безпеки. Можливі сценарії такі: після встановлення

нової точки доступу; у процесі розширення мережі. Автоматична оптимізація (Self-Optimization) базується на параметрах точок доступу, які адаптуються для досягнення оптимальної продуктивності. Основні завдання: мінімізація перешкод між точками доступу; балансування навантаження; максимізація покриття; підтримка якості обслуговування. Можна використати алгоритми: аналіз спектру; оптимізація каналного розподілу; динамічне керування потужністю. Автоматичне відновлення полягає у реалізації при якій мережа виявляє та усуває несправності. Можливі сценарії в такому випадку: втрата зв'язку з точкою доступу; зниження продуктивності через перешкоди або перевантаження. Дії полягають у збільшенні потужності сигналу сусідніх точок доступу для покриття "мертвих зон" та перемиканні клієнтів на альтернативні точки доступу.

Етапи роботи моделі самоорганізації:

- 1) сканування середовища;
- 2) прийняття рішень;
- 3) оптимізація параметрів;
- 4) моніторинг і адаптація.

Сканування середовища здійснюють точки доступу, виконуючи моніторинг інтенсивності сигналів сусідніх точок доступу, завантаженості каналів, рівня перешкод у спектрі, стану клієнтів (якість з'єднання, рівень сигналу, тип трафіку). Кожна точка доступу оцінює стан середовища та порівнює його з оптимальними параметрами. При цьому використовуються алгоритми машинного навчання або евристичні підходи для прийняття рішень. Оптимізація параметрів включає розподіл частотних каналів, регулювання потужності передавача, перерозподіл клієнтів. Для розподілу частотних каналів застосовуватимемо алгоритм, що знижує перекриття каналів між точками доступу. Для регулювання потужності передавача зменшуватимемо потужності для зменшення перекриття, збільшуватимемо потужності для усунення "мертвих зон". Перерозподіл клієнтів реалізуємо через перенаправлення клієнтів на точки доступу з меншою завантаженістю. Також, потрібно здійснювати постійний моніторинг стану мережі для оперативного реагування на зміни. Наприклад, для виявлення нових перешкод і збільшення

кількості клієнтів у певній зоні.

В моделі самоорганізації застосовуються такі алгоритми:

- 1) алгоритм оптимізації каналів;
- 2) алгоритм балансування навантаження;
- 3) алгоритм виявлення несправностей;
- 4) алгоритм адаптивної оптимізації.

Алгоритм оптимізації каналів стосується виявлення зайнятих і вільних каналів та використовується для мінімізації конфліктів між сусідніми точками доступу. Прикладом такого алгоритму може бути алгоритм динамічного розподілу каналів (Dynamic Channel Allocation, DCA).

Алгоритм балансування навантаження відповідає за перемикання клієнтів із перевантажених точок доступу. В ньому використовуватимемо такі показники: кількість підключених клієнтів; швидкість передачі даних; якість сигналу.

Алгоритм виявлення несправностей застосовується для визначення зон зі слабким сигналом, автоматичного коригування параметрів потужності сусідніх точок доступу.

Алгоритм адаптивної оптимізації використовуватимемо для навчання на основі історичних даних та прогнозування змін у мережі (наприклад, збільшення трафіку в години пік).

Перевагами моделі самоорганізації є мінімізація витрат на адміністрування, тобто мережа самостійно налаштовує параметри, швидка адаптація, тобто здійснюється автоматичне реагування на зміни у мережевому середовищі, досягнення підвищеної надійності за рахунок виявлення та усунення несправностей у реальному часі, досягнення покращеної продуктивності та оптимального використання ресурсів мережі.

Недоліками моделі самоорганізації є складність впровадження, обмежена ефективність у великих мережах, потенційні конфлікти. Він вимагає значних обчислювальних ресурсів для аналізу даних. Автономне налаштування може призводити до неузгодженостей між точками доступу. Недоліки самоорганізації можуть бути мінімізовані за рахунок розроблення нового методу координації точок

доступу.

Модель самоорганізації стає особливо ефективною в умовах динамічних середовищ і великих мереж із високою щільністю пристроїв, де необхідно забезпечити автономність роботи та високу якість обслуговування.

Опис функцій моделі з самоорганізацією через математичні формули відображає логіку роботи кожного з етапів: автоматичного налаштування; оптимізації; відновлення та моніторингу.

Розглянемо їх детальніше з побудовою функцій, які забезпечують підтримку моделі з самоорганізацією.

Функцію автоматичного налаштування базуватимемо на каналі для точки доступу і задамо так:

$$c_i = \arg \min_{c \in C \setminus C_{kor}} I(c), \quad (2.4)$$

де $I(c)$ — функція перешкод на каналі c ; C — множина доступних каналів; C_{kor} — множина каналів, зайнятих сусідніми точками доступу; c_i - канал для точки доступу.

Налаштування потужності передавача задамо константою так:

$$P_i = P_{init}, \quad (2.5)$$

де P_{init} — початковий рівень потужності передавача (наприклад, 20 мВт).

Задамо функцію автоматичної оптимізації окремо для балансування навантаження і окремо для оптимізації каналів.

Для визначення балансування навантаження введемо функції так:

$$\begin{aligned} P_i &= \max(P_i - \Delta P, P_{min}) \text{ для } N_i > N_{max}; \\ P_i &= \min(P_i + \Delta P, P_{max}) \text{ для } N_i < N_{min}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де N_i — кількість клієнтів, підключених до точки доступу; P_{min}, P_{max} — мінімальна і максимальна потужність передавача; ΔP — крок зміни потужності.

Для подання оптимізації каналів введемо функцією так, щоб якщо канал c_i (формула (2.4)) точки доступу збігається із зайнятими сусідами $C_{usedC}_{\{\text{used}\}}$, то вибирається новий канал.

Функцію автоматичного відновлення будемо будувати щодо виявлення несправностей і перенаправлення клієнтів.

Функцію для виявлення несправностей задамо так:

Якщо точка доступу $A_{td,k}$ вийшла з ладу, тобто:

$$A_{td,k} \notin M_{A_{td}},$$

то збільшуємо потужність сусідніх точок, які перекривають її зону, так:

$$P_j = \min(P_j + \Delta P, P_{max}). \quad (2.7)$$

При перенаправленні клієнтів клієнти, що були підключені до $A_{td,k}$, перенаправляються до сусідніх точок $A_{td,j}$ із максимальною якістю сигналу:

$$A_{td,j} = \arg \max_j S_{j,k}, \quad (2.8)$$

де $S_{j,k}$ — сила сигналу від точки доступу $A_{td,j}$ до клієнта.

Функція моніторингу стану мережі визначається з урахуванням загальної кількості клієнтів, середньої кількості клієнтів, перевантаження точок доступу.

Загальну кількість клієнтів визначимо так:

$$N_{cl} = \sum_{i=1}^M N_i, \quad (2.9)$$

де M — кількість точок доступу.

Середню кількість клієнтів на точку доступу визначимо так:

$$N_{cl,s} = \frac{N_{cl}}{M}. \quad (2.10)$$

Визначення перевантажених точок доступу задамо так, що якщо $N_i > N_{max}$, то точка доступу буде перевантаженою.

Повне модель самоорганізації задамо з урахуванням сканування середовища, прийняття рішення, моніторингу і адаптації та автоматичного відновлення. Розглянемо детальніше їх та визначимо їх відповідними аналітичними виразами.

Для реалізації складових частин моделі самоорганізації задамо алгоритм, який буде ітеративно виконувати наступні кроки:

- 1) сканування середовища;
- 2) прийняття рішення;
- 3) моніторинг і адаптація;
- 4) автоматичне відновлення.

При скануванні середовища для кожної точки доступу визначаються:

- 1) канали сусідніх точок C_{cl} ;
- 2) кількість підключених клієнтів N_i ;
- 3) рівень сигналу $S_{j,k}$ для кожного клієнту.

При прийнятті рішень визначаються нові значення параметрів:

- 1) канал $c_i = \arg \min_{c \in C \setminus C_{kor}} I(c)$;
- 2) потужність передавача $P_i = \begin{cases} P_i = \max(P_i - \Delta P, P_{min}) & \text{для } N_i > N_{max}; \\ P_i = \min(P_i + \Delta P, P_{max}) & \text{для } N_i < N_{min}. \end{cases}$

Моніторинг і адаптація базуються на постійно обчислюваних середніх та граничних параметрів мережі:

1) середня кількість клієнтів $N_{cl,s}$;

2) перевантажені точки $A_{td,j}$, які потребують оптимізації.

Автоматичне відновлення здійснюватимемо при умові, що якщо $A_{td,k} \notin M_{Atd}$, то збільшуємо потужність сусідніх точок $A_{td,j}$, тобто $P_i = \min(P_i + \Delta P, P_{max})$.

Ці формули описують основні процеси моделі з самоорганізацією та дозволяють забезпечити динамічну адаптацію мережі Wi-Fi до змін у середовищі та умовах експлуатації.

Схема, яка зображена на рис. 2.1, демонструє взаємодію функцій у моделі самоорганізації Wi-Fi мережі. Вона ілюструє взаємозв'язок між такими її компонентами: самоконфігурацією; оптимізацією; відновленням і моніторингом, які взаємодіють для забезпечення самоорганізації.

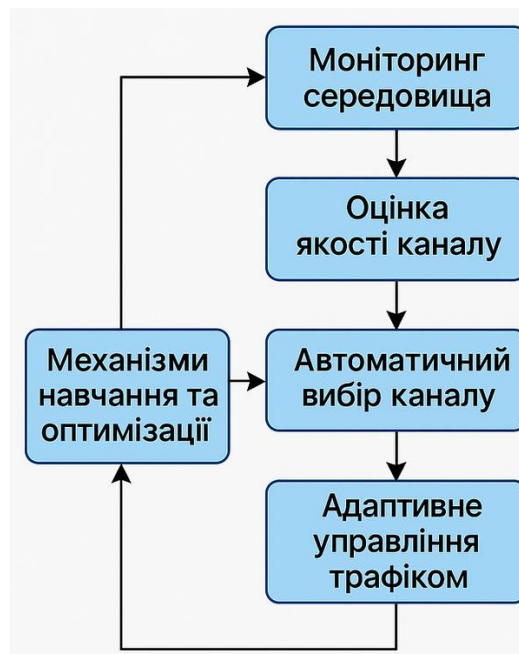


Рисунок 2.1 – Взаємодія функцій у моделі самоорганізації

Модель самоорганізації Wi-Fi мережі базується на ідеї автоматичного управління ключовими параметрами мережі без участі людини. Основна мета — це забезпечення стабільного покриття, високої пропускної здатності та належної якості з'єднання, що досягається через постійну адаптацію до умов середовища та зміни поведінки користувачів. Взаємодія функцій у такій системі відбувається циклічно: кожен компонент впливає на інші, формуючи замкнене коло адаптації. Все починається з моніторингу середовища, який забезпечує безперервне збирання даних

про інтерференцію, рівень сигналу, завантаження каналів і активність клієнтів. Ці дані передаються до функції оцінки якості каналу, яка аналізує показники, такі як SNR, RSSI, PER, і визначає технічні характеристики зв'язку в поточних умовах. Результати аналізу надходять до функції автоматичного вибору каналу, яка визначає оптимальний частотний діапазон для мінімізації перешкод та максимізації пропускну здатності. Паралельно відбувається контроль потужності передавача, що дозволяє зменшити рівень взаємних завад між точками доступу та клієнтами, а також адаптуватися до змін у топології мережі. Наступним етапом є адаптивне управління трафіком, що відповідає за розподіл смуги пропускання між користувачами з урахуванням їхніх потреб і пріоритетів, забезпечуючи якість обслуговування в реальному часі. Управління асоціацією клієнтів тісно пов'язане з цим процесом, адже клієнтів спрямовують до найменш завантажених точок доступу, щоб балансувати навантаження та зберігати стабільність підключення. Усі ці компоненти підтримуються механізмами навчання та оптимізації, які аналізують історичні дані, виявляють закономірності, будують прогнози та пропонують стратегії покращення параметрів у майбутньому. Таким чином, рішення однієї функції прямо чи опосередковано впливають на всі інші, і вся система самостійно підлаштовується під динамічне середовище, що дозволяє досягти ефективної роботи без постійного адміністрування.

Таким чином, розроблено модель для координації точок доступу в мережах Wi-Fi згідно принципу самоорганізації. Її основними параметрами є спроможність всієї системи до автоматичного налаштування, оптимізації, відновлення та моніторингу.

2.3 Оптимізація при здійсненні вибору каналу Wi-Fi

У зв'язку з обмеженою кількістю каналів у діапазоні 2,4 ГГц, робота в неліцензованому діапазоні завжди була складною через перевантаження. Крім того, робота інших технологій, таких як мікрохвильові печі та Bluetooth у тому ж діапазоні, а також зростаюча щільність мереж WLAN зробили роботу в перевантаженому діапазоні ще складнішою. У зв'язку з тим, що діапазон страждає від перешкод, канал,

на який точка доступу вирішує призначити свій доступ, набув великого значення. Тому, є потребу в удосконаленні алгоритмів вибору каналів.

Із відомих алгоритмів, які можуть бути взяті за основу для удосконалення процедури вибору каналу, відмінними за продуктивністю були алгоритми, які враховували зворотний зв'язок з точки зору умов перешкод каналів, що розглядаються точкою доступу. З іншого боку, одним з основних недоліків алгоритмів, які враховують зворотний зв'язок є велике робоче навантаження і необхідні застосункові витрати на сигналізацію. Тому, розроблятимемо евристичний, орієнтований на користувача алгоритм вибору каналів з кластерним механізмом звітності з низькими застосунковими витратами. Алгоритм повинен буде використовувати просторово-часову кореляцію перешкод, що призводить до того, що близькі до нього вимоги мають схожі умови каналу. Замість того, щоб в мережі звітувати про кожен канал-кандидат, який розглядався точкою доступу, що значно збільшує застосункові витрати на сигналізацію та обчислювальне перевантаження, точка доступу розумно розподіляє робоче навантаження. Він використовуватиме неконтрольований алгоритм кластеризації машинного навчання для групування каналів, які знаходяться поруч один з одним на кластери, а потім розподілити навантаження звітності зворотного зв'язку на всі канали в межах одного кластера. В результаті кожен канал не повинен буде звітувати про весь набір каналів, що розглядаються, тим самим зменшуючи застосункові витрати і надмірність в інформації зворотного зв'язку. Одним із домінуючих порушень у мережах WLAN є перешкоди, оскільки всі пристрої WLAN використовують один і той самий неліцензований діапазон, а також з іншими технологіями, такими як Bluetooth, тощо. Крім того, у зв'язку зі збільшенням кількості мереж WLAN перешкоди спільного каналу стали неминучою проблемою в системах Wi-Fi. Пом'якшення такої проблеми може бути надзвичайно складним через просторово розподілені перешкоди, зміну в часі активності передачі та відсутність співпраці між спільно існуючими точками доступу. Як наслідок, одним із основних факторів, який може суттєво вплинути на продуктивність мережі Wi-Fi, є канал роботи, призначений точці доступу, яка потім використовується точкою доступу для зв'язку. Процес призначення каналу роботи

дуже важливий, оскільки призначення каналу з високими перешкодами на точку доступу безпосередньо знижує продуктивність і досягну швидкість передачі даних для кожної точки доступу, враховуючи, що мережі WLAN працюють у неліцензованому діапазоні, є дуже перспективним рішенням. В існуючих процедурах призначення каналу зазвичай призначається точці доступу користувачем під час процесу ініціалізації. На додаток до відсутності зручності для користувача, ця процедура по суті є статичним призначенням каналів, яке не враховує динамічні перешкоди та умови розподілених каналів мереж WLAN. Це початкове призначення каналу залишається незмінним, якщо користувач не вирішить його змінити. При динамічному використанні каналів сусідніми точками доступу це означає, що початкове призначення каналів більше не може бути оптимальним через змінний у часі та просторово розподілений характер перешкод спільного каналу в неліцензованому діапазоні. Крім того, точка доступу прямо не запитує зворотний зв'язок про стан каналу перед призначенням каналу. Без збору зворотного зв'язку також не можуть враховувати кондиції каналів. Це означає, що в умовах щільного розгортання точка доступу, швидше за все, буде призначена для роботи в каналі, де зазнають серйозних перешкод між каналами, тоді як точка доступу не в змозі своєчасно налаштувати призначений канал для адаптації. Це означає, що багато точок доступу з перекриттям не налаштовані належним чином для роботи на різних каналах, щоб уникнути перешкод, що призводить до погіршення користувацького досвіду в щільних сценаріях. Це серйозна проблема, оскільки основна мета точки доступу полягає в тому, щоб забезпечити найкращий користувацький досвід, а наявність каналів, що перетинаються, які працюють на одному каналі, не дає нічого, крім гарантії, що така мета не може бути досягнута. Неоптимальне виконання поточної практики призначення та використання каналів підтверджує потребу в розробленні алгоритмів динамічного вибору каналів, які дають можливість переналаштовуватися з часом залежно від умов каналу та своєчасно адаптуватися. Відомі алгоритми дають точці доступу можливість запитувати зворотний зв'язок для вирішення проблеми стану розподіленого каналу та покращення загальної продуктивності мережі Wi-Fi. Підвищення продуктивності, пов'язано з застосункові витратами на механізм

зворотного зв'язку, який стає ще більшим зі збільшенням числа каналів в мережі. У зв'язку з динамічним характером умов каналу вибір каналу в точці доступу повинен своєчасно реагувати на час з низькою затримкою, щоб забезпечити доцільність обраного каналу. Коли канал довго збирає зворотний зв'язок, то зібрані умови каналу вже могли повністю застаріти. Крім того, він не має адаптивного процесу сталого розвитку після каналу, щоб тримати точку доступу в курсі можливих змін у стані обраного каналу через динамічний характер бездротового середовища. Крім того, він допускає, що всі точки доступу підтримують одночасну багатоканальну роботу, що серйозно може обмежити застосовність алгоритму.

Оптимізація вибору каналу Wi-Fi є важливим кроком для покращення швидкості та стабільності бездротового з'єднання.

Основні кроки алгоритму для вибору оптимального каналу: аналіз навантаження на канали; автоматичний вибір каналу. Розглянемо їх детальніше.

Для аналізу навантаження на канали потрібно використовувати спеціальні програми для аналізу зайнятості каналів (наприклад, WiFi Analyzer для Android або inSSIDer для Windows). Вибирати канали треба ті, які мають найменшу кількість сусідніх мереж. У діапазоні 2.4 ГГц оптимальні канали – 1, 6 і 11, оскільки вони не перекриваються. Якщо всі три канали завантажені, то потрібно вибрати той, де рівень сигналу інших мереж найнижчий. У 5 ГГц більше доступних каналів (36, 40, 44, 48, 149 тощо), і вони менш перевантажені. Потрібно уникати DFS-каналів (52-144), якщо роутер або пристрої їх погано підтримують. Багато сучасних роутерів мають функцію автоматичного вибору найкращого каналу. Якщо роутер підтримує цю функцію, то треба активувати її та протестувати результат. Розташування роутера: встановити у центральній частині приміщення подалі від перешкод (стіни, мікрохвильові печі, інші електроприлади). Нове програмне забезпечення може містити поліпшення щодо вибору каналу. Перехід на 5 ГГц здійснюють, якщо пристрої підтримують 5 ГГц, тоді використовують цей діапазон для кращої швидкості. Правильний вибір каналу допоможе уникнути інтерференції та покращити якість Wi-Fi-з'єднання.

Розробимо алгоритм автоматичного вибору Wi-Fi каналу з евристиками. Цей алгоритм дозволить автоматично вибирати найкращий канал для точки доступу на

основі аналізу зайнятості каналів, рівня перешкод та інших факторів.

Основні етапи роботи алгоритму:

- 1) сканування доступних Wi-Fi мереж;
- 2) аналіз рівня завантаженості каналів;
- 3) евристична оцінка каналів;
- 4) вибір оптимального каналу

Сканування доступних Wi-Fi мереж досягається через використання API драйвера Wi-Fi або інструменти типу iwlist scan (Linux), Netsh wlan show networks mode=bssid (Windows), або бібліотеки для Python (scapy, ruwifi) та отримання списку доступних точок доступу з їхніми BSSID, рівнем сигналу (RSSI), та каналами.

Аналіз рівня завантаженості каналів отримуємо так: розраховуємо щільність точок доступу на кожному каналі; враховуємо потужність сигналу (чим ближчий конкурент, тим сильніше впливає на наш сигнал): якщо використовується 2.4 ГГц, враховуємо перекриття сусідніх каналів (наприклад, сигнал на 1-му каналі впливає на 2-й і 3-й).

Евристична оцінка каналів будується на тому, що кожному каналу присвоюється рейтинг за такими критеріями: кількість точок доступу на каналі (чим менше, тим краще); середня потужність сигналу сусідніх точок (чим нижче, тим краще); канал неперекриваючий (тільки для 2.4 ГГц: 1, 6, 11); канал DFS для 5 ГГц дає змогу уникати зайнятих каналів, якщо пристрої підтримують; наявність перешкод (наприклад, радари на DFS-каналах).

Вибір оптимального каналу здійснюємо так: обираємо канал із найменшим рейтингом завантаженості; якщо кілька каналів мають однаковий рейтинг, то треба вибирати той, який знаходиться далі від зайнятих сусідніх каналів; якщо умови змінюються, то алгоритм повторює перевірку та може перемикає канал (за умови підтримки 802.11h для динамічного вибору частот).

Оптимізації та розширення алгоритму базуються на виконанні таких етапів: підтримка 5 ГГц; динамічна зміна каналу; застосування методів штучного інтелекту.

Для підтримки 5 ГГц треба додати підтримку каналів 36-165 і використовувати DFS-канали, якщо вони вільні.

Для динамічної зміни каналу треба виконувати повторний аналіз раз на 5-10 хвилин та враховувати потенційну зміну каналу щодо порушення поточних з'єднань.

Використання машинного навчання краще здійснювати для прогнозування найкращого каналу залежно від часу доби та активності користувачів.

Цей алгоритм допоможе автоматично вибирати найкращий канал для стабільного Wi-Fi-з'єднання.

Розроблений евристичний, орієнтований на користувача, алгоритм вибору каналів з кластерним механізмом звітності, на відміну від існуючих алгоритмів вибору каналів, де точка доступу залежить від прямого або непрямого зворотного зв'язку від кожного пов'язаного каналу на всьому наборі каналів, що розглядаються для роботи, спричиняє високе робоче навантаження та значні застосункові витрати зворотного зв'язку зі зростанням розміру мережі. Він реалізує механізм звітності на основі кластерів, який використовує просторову кореляційну природу інтерференції для того, щоб розділити зворотний зв'язок на множину каналів між кластерами, які знаходяться в безпосередній просторовій близькості, що зменшує загальні застосункові витрати на зворотний зв'язок і робоче навантаження, не жертвуючи при цьому точністю інформації зворотного зв'язку. Крім того, запропонована система, також, призначена для моніторингу обраного каналу з урахуванням варіативного та динамічного в часі характеру перешкод. Таким чином, динамічна система призначена для моніторингу умов перешкод за допомогою запропонованого механізму звітності на основі кластеру шляхом призначення певних кластерів у межах кожного кластера, які відповідають за періодичний моніторинг стану каналу та визначення точки доступу, коли обраний канал вже не придатний для використання. Щоб створити певний імунітет до викидів даних і тимчасових коливань у вимірюваннях каналів, а також уникнути непотрібного спрацьовування точки доступу, також потрібно включати алгоритм фільтрації для каналів.

2.4 Висновки до другого розділу

Розроблено етапи методу координації точок доступу в мережах Wi-Fi, в основі

яких закладено алгоритм, що забезпечує схему координації. Також, розроблено модель для координації точок доступу в мережах Wi-Fi згідно принципу самоорганізації. Її основними параметрами є спроможність всієї системи до автоматичного налаштування, оптимізації, відновлення та моніторингу. Розроблений евристичний, орієнтований на користувача, алгоритм вибору каналів з кластерним механізмом звітності, де точка доступу залежить від прямого або непрямого зворотного зв'язку від кожного пов'язаного каналу на всьому наборі каналів, що розглядаються для роботи, спричиняє високе робоче навантаження та значні застосункові витрати зворотного зв'язку зі зростанням розміру мережі.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI

3.1 Кластеризація в системі координації точок доступу в мережах Wi-Fi

В контексті моделювання системи координації точок доступу в мережах Wi-Fi розглянемо спочатку неліцензований діапазон 2,4 ГГц, бо він дуже широко використовується не тільки в Wi-Fi 4, але і в більшості поставок Wi-Fi, включаючи майбутні під'єднання до мережі Wi-Fi 7. Діапазон частот 2,4 ГГц має від 11 до 14 частотних каналів, з яких точки доступу можуть вибрати. Кількість доступних каналів залежить від регіону розгортання. Наприклад, в Європі доступно 13 каналів, а в США – лише 11. У зв'язку з цим найбільш обмежувальний режим з 11 каналів розглянемо для моделювання системи. Система може вибрати будь-який з цих каналів для підтримки своєї роботи. Серед усіх доступних каналів у цьому діапазоні лише три канали не перекриваються. Оскільки загальновизнано, що мережі працюють на одному з каналів, що не перекриваються, розглянемо тільки ці три (1, 3, 6) канали. В результаті заважати один одному будуть тільки точки доступу, що працюють в одному каналі. Канал Wi-Fi може бути змодельований за допомогою бібліотеки Python. Python використовують для створення, маніпулювання та вивчення структури, динаміки та функцій складних мереж. Кожен вузол має чотири основні характеристики: мітку, положення, край і вагу. Мітка задається у вигляді «точки доступу» або числа. Позиція в просторі – це всі вузли, які передбачаються на одній висоті через спрощення розрахунків втрат шляху. Ребро представляє зв'язок між вузлами. Вага вузлів ребер представляє потужність прийнятого сигналу у вузлах. Коли два вузли працюють по одному каналу, то буде ребро з вагою, що представляє прийнятну потужність перешкод у одному вузлі, викликаних другим вузлом. Ваги ребер між точкою доступу та будь-яким з пов'язаних з нею вузлів будуть представлені у вигляді формулювання проблеми. Розглядаючи точки доступу з декількома сусідніми перешкодами, які можуть бути як пристроєм Wi-Fi, так і пристроєм без Wi-Fi, що працює в загальному неліцензованому діапазоні, проблема дослідження полягає в тому, що вона розширена як проблема з метою призначення каналу, що дає

найвищий середній час на кластер при мінімізації робочого навантаження та застосункових витрат зворотного зв'язку. В результаті проблему дослідження можна переписати так: потужність передачі точки доступу та виділена смуга пропускання фіксована; точка доступу здатна працювати на декількох каналах одночасно.

Алгоритм кластеризації, який можна використати - це алгоритм просторової кластеризації застосунків з шумом на основі щільності. Цей алгоритм кластеризації обраний тому, що він може формувати кластери з довільними формами з вищою ефективністю порівняно з алгоритмами ієрархічної кластеризації, без обмеження розмірів кластерів, і може обробляти викиди/шуми задовільним чином. Крім того, він не вимагає апіорного визначення кількості кластерів, на відміну від k -середнього. Алгоритм має два гіперпараметри: радіус; мінімальна кількість точок, яка необхідна для визначення точки ядра. Розглядаючи сукупність точок в деякому просторі, вони групуються наступним чином: точка доступу основною точкою доступу, якщо хоча б одна з основних точок доступу знаходиться біля неї; основна точка доступу утворює кластер разом з усіма точками, які з неї досяжні, незалежно від їх належності до ядра. Кластеризація k -середніх передбачає кількість кластерів, перш ніж застосовувати алгоритм кластеризації. З іншого боку, цей підхід не вимагає на початку вказувати кількість кластерів у даних. Це важливо, оскільки метою кластеризації є об'єднання точок, що знаходяться в безпосередній близькості один від одного, в кластери, кількість яких не може бути передбачена заздалегідь з огляду на характер мереж WLAN. Більше того, кількість кластерів не є гіперпараметром, який потрібно вирішити перед розгортанням, а простим результатом того, наскільки близько точки доступу знаходяться в просторі. Цей алгоритм кластеризації набагато стійкіший до викидів порівняно з кластеризацією k -середніх. Кластеризація k -середніх припускає, що всі кластери походять зі сферичних розподілів з декількома середніми, але рівною коваріаційною матрицею. Цей алгоритм не робить жодних припущень щодо розподілу набору даних.

Розглянемо схему підбору каналів. Для досягнення раніше сформульованих цілей розробимо техніка звітності точок доступу на основі низьких застосункових витрат, заснована на кластерах, для якої система може вибрати найбільш підходящий

канал. Системою пропонується використати алгоритм кластеризації для призначення точкам доступу мінімальної кількості каналів для повідомлення про зворотний зв'язок на основі кластера, щоб система мала повну поінформованість про всі канали-кандидати, які розглядаються для призначення. Розглядаючи просторову кореляцію перешкод, важливим є те, які точки доступу знаходяться в безпосередній близькості між собою, відчувають схожі умови співканальної інтерференції. Основна мета алгоритму кластеризації полягає в тому, щоб згрупувати близькі точки доступу в кластери і розділити навантаження по повідомленню про умови перешкод на множині каналів між ними в межах одного кластера, тим самим мінімізуючи робоче навантаження та зворотний зв'язок. Параметром кластеризації є розташування точок доступу в просторі за рахунок просторової кореляції перешкод. Другим параметром кластеризації, що розглядається в процесі кластеризації, є модель для загального каналу. Причина такого вибору конструкції полягає в тому, щоб переконатися, що точки доступу в межах одного кластеру мають однакові умови перешкод. А умови перешкод, які впливають на точки доступу, є функцією як втрати шляху через відстань, так і через наявність перешкод у зоні розгортання, що призводить до втрати шляху через дифракцію, відбиття та поглинання. В результаті дві дві точки доступу можуть знаходитися в одному просторовому кластері, але відчувати різні умови інтерференції. Отже, дві точки доступу належать до одного кластера тоді і тільки тоді, коли вони належать до одного просторового кластера або належать до одного і того ж кластера на основі моделі. Крім динамічного характеру бездротового середовища, точка доступу також повинна враховувати можливий мобільний характер. Система періодично оцінює розташування точок доступу та запускає алгоритм щодо їх місцезнаходження, і як тільки вони виявляють, що формується новий кластер або відбуваються будь-які зміни в поточних кластерах, то система призначає нові твірні елементи кластерів відповідним кластерам. Нові кластерні елементи продовжують контролювати умови перешкод на обраному каналі роботи та запускають точку доступу для повторного вибору каналу, якщо вона виявляє наявність виникаючих супутніх перешкод.

Періодичність, з якою точка доступу оцінює розташування, залежить від

характеру мережі. Мережі з низькою мобільністю не потребуватимуть дуже частих оцінок за допомогою точки доступу. Отже, період є розрахунковим параметром, який можна встановити відповідним чином. Однак одним з важливих аспектів, який слід враховувати, є той факт, що значення моделі, оцінені твірними елементами кластерів, або передбачуване розташування пов'язаних точок доступу схильні до впливу шуму, помилок або тимчасових коливань вимірних значень через затінення або багатопроменеві втрати. Для того, щоб усунути цей шум від пошкодження вимірюваних даних, для знешумлення використовується фільтр для знешумлення для отримання більш точних зразків даних. Основна ідея фільтра полягає в рухомому, зваженому середньому, яке замінює викиди медіаною набору даних. Фільтр в основному був розроблений для того, щоб видалити викиди та окремі точки даних з наборів даних, і він робить це ефективно. Фільтр оцінює точку як правильну. Коли точка доступу оцінюється як одинична, то точка даних замінюється медіаною. Моделі втрати шляху та мережі, можуть бути використані для проведення моделювання на Python. Мережа працює на діапазоні 2,4 ГГц, а сукупністю розглянутих каналів для роботи є канали 1, 6 і 11.

При виконанні алгоритму без кластеризації система отримує інформацію зворотного зв'язку. Точка доступу має значення на кожному доступному каналі. Тому, потрібно удосконалити алгоритм вибору каналів з низьким застосунковими витратами та забезпечити кластерний механізм звітності. Вибір поточного каналу відбувається за допомогою прямого введення від користувача в меню налаштувань точки доступу Wi-Fi. Крім відсутності зручності у використанні, процес є статичним. Іншими словами, коли умови каналу змінюються і вибраний раніше канал більше не підходить, то канал роботи не змінюється до тих пір, поки користувач знову не відвідає меню сторінки налаштувань точки доступу. Проблема з отриманням зворотного зв'язку на всіх каналах кандидатів, які розглядає система, полягає у великих застосункових витратах зворотного зв'язку, які зростають зі збільшенням кількості каналів кандидатів.

Тому, доцільно використовувати механізм звітності на основі кластерів з низькими застосунковими витратами, який використовує переваги просторової

кореляційної природи перешкод. Іншими словами, точки доступу об'єднуються в єдиний кластер, а потім розподіляють навантаження по скануванню набору каналів-кандидатів між кластером. Як наслідок, навантаження та застосункові витрати на зворотний зв'язок розподіляються між кластером. Це ключ до зменшення застосункових витрат на зворотний зв'язок без шкоди для точності інформації зворотного зв'язку. Таким чином, цей алгоритм може досягати зменшення застосункових витрат на зворотний зв'язок і робочого навантаження при збереженні точності повідомленої інформації.

Розробимо алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi з урахуванням перекриття зон дії та каналів зв'язку з поданням його основними кроками.

Алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi.

Вхідні дані:

- 1) координати точок доступу (x_i, y_i) ;
- 2) радіуси покриття точок доступу r_i ;
- 3) канали зв'язку точок доступу c_i (1–13 для 2.4 ГГц або 36+ для 5 ГГц).

Результатом роботи алгоритму будуть побудовані кластери точок доступу, що мінімізують інтерференцію.

Основні кроки алгоритму.

Крок 1. Визначення перекриття зон покриття:

- 1.1) для кожної пари точок доступу $A_{td,j}$ та $A_{td,i}$ обчислити відстань між ними:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2};$$

якщо $d_{i,j} < (r_i + r_j)$, то зони перекриваються.

- 1.2) побудувати граф перекриття, де вузлами є точки доступу, а ребра з'єднують точки, чії покриття перекриваються.

Крок 2. Групування точок доступу за перекриттям:

- 2.1) використати алгоритм кластеризації на графах: спектральна кластеризація; DBSCAN (якщо є щільні групи); Louvain (якщо мережа велика);

- 2.2) кластери повинні мати мінімальний рівень взаємного перекриття.

Крок 3. Оптимізація за каналами зв'язку

3.1) у кожному кластері призначити канали точкам доступу так, щоб мінімізувати використання однакових каналів у перекритих зонах, вибирати канали з мінімальним рівнем шуму (якщо є дані про спектральну завантаженість);

3.2) використати метод розфарбовування графа, де кожен вузол точок доступу це вершина графу, кожне перекриття це ребро та розфарбувати граф так, щоб сусідні вузли мали різні кольори (канали).

Крок 4. Перевірка та оптимізація:

4.1) оцінити рівень інтерференції;

4.2) якщо є сильні завади, то повторити етап призначення каналів;

4.3) розглянути відключення зайвих точок доступу або зменшення потужності.

Цей алгоритм зменшує інтерференцію між точками доступу та покращує якість Wi-Fi-мережі.

Реалізація алгоритму кластеризації точок доступу Wi-Fi на мові C++ з використанням бібліотеки OpenCV для DBSCAN та NetworkX (через Boost Graph) для розфарбовування графа в Застосунку В. Цей код використовує DBSCAN для кластеризації точок доступу, будує граф перекриття точок доступу, розфарбовує граф для призначення каналів, призначає канали з мінімальним перекриттям. Необхідні бібліотеки для його виконання: OpenCV (DBSCAN); Boost Graph.

Таким чином, розроблено алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi, особливістю якого є урахування перекриття зон дії та каналів зв'язку, що в результаті дасть змогу побудувати кластери точок доступу, які мінімізують інтерференцію.

3.2 Алгоритм координації кількох точок доступу в мережі

Зростаюча щільність мереж і спільне використання обмежених, неліцензованих ресурсів, доступних для мереж Wi-Fi, призвело до погіршення продуктивності в розгортаннях, де кілька точок доступу знаходяться поблизу одна до другої. Щоб зменшити взаємні перешкоди, було розроблено схему розділення каналів, яка дозволяє кожній точці доступу вибирати канал, вільний від перешкод. Незважаючи

на розроблений алгоритм з кластеризацією, який пропонує рішення для пом'якшення перешкод при щільному розгортанні, не гарантується, що мережа з кількома точками доступу матиме кілька різних каналів для розміщення передач з кількома точками доступу. В результаті, в деяких сценаріях, мережа з декількома точками доступу повинна була б використовувати одні й ті ж ресурси каналу і координувати свої передачі даних. Основна мета координації полягає в тому, щоб точки доступу в мережі з кількома точками доступу домовлялися та узгоджували певні параметри передачі в просторовій, частотній та енергетичній сферах, щоб підтримувати перешкоди між ними на допустимому рівні, максимізуючи паралельні передачі та загальну продуктивність мережі. Зокрема, було розглянуто можливість впровадження координованого просторового повторного використання, де просторова координація може досягатися за допомогою управління потужністю передачі координованих точок доступу, щоб мінімізувати перешкоди між точками доступу. Незважаючи на покращення продуктивності з розробленим алгоритмом з кластеризацією, але вона все ще знижується в сценаріях надщільного розгортання через просторову близькість сусідніх точок доступу в щільному розгортанні. Іншими словами, продуктивність мережі з кількома точками доступу, все ще може відчувати значні перешкоди, незважаючи на обмеження потужності, накладене на точки доступу через їх розташування в безпосередній близькості між собою. В результаті, мережа з декількома точками доступу в умовах сильних перешкод між ними, не матиме іншого вибору, окрім як мпти інтерференцію спільного каналу через обмеження просторової області, навіть коли інші домени можуть бути більш придатними для координації. Крім того, розглянута координація частотних доменів, де канал розділений між мережею з декількома точками доступу, де кожній точці доступу виділяється домен, що не перекривається. Незважаючи на те, що координація частотної області успішно усуває перешкоди між ними, це не є прийнятним підходом у надщільному розгортанні, оскільки доступний канал може бути недостатньо широким, щоб вмістити всі точки доступу, що беруть участь у передачі кількох точок доступу. Отже, тому потрібна багатовимірна схема координації з декількома точками доступу з усвідомленням ситуації, яка спрямована на гарантування мінімально необхідного

співвідношення сигнал/перешкода для кожної точки доступу у всіх каналах, що беруть участь у передачі з кількома точками доступу. Це може бути досягнуто багатовимірним характером розроблюваного алгоритму комбінованої координації, який дозволить оцінювати умови між точками доступу перешкод, розробляти як частотні, так і просторові схеми координації доменів, а також задавати відповідні параметри передачі. Розроблюваний комбінований алгоритм повинен мати здатність адаптуватися до різної щільності розгортання та гарантувати мінімально необхідний сигнал для кожної точки доступу в мережі з кількома точками доступу завдяки можливості застосовувати координацію в різних доменах, на відміну від традиційних варіантів, які різко страждають у щільних та надщільних сценаріях.

В попередніх стандартах 802.11be, 802.11ax було зроблено перші кроки до координації та співіснування кількох точок доступу, запровадивши просторове повторне використання на основі живлення, що збільшує паралельну передачу між сусідніми точками доступу. Незважаючи на підвищення продуктивності, що спостерігається завдяки впровадженню просторового повторного використання, було показано, що просторове повторне використання може погіршити загальну продуктивність мережі, де такі точки доступу матимуть дуже низький сигнал через відсутність точок доступу, що поінформовані про перешкоди, які відчувають. Це пов'язано з відсутністю справжньої координації. Як наслідок, точки доступу, розгортаючи просторове повторне використання, все ще можуть спричиняти понад допустимі перешкоди між собою на сусідніх каналах. При такій схемі має бути збережено механізм зворотного зв'язку між точками доступу та його асоційованими каналами, що дозволяє точкам доступу обмінюватися інформацією про перешкоди та втрату шляху, надаючи їм усвідомлення того, що каналів не вистачає. Незважаючи на підвищення продуктивності, одним з головних недоліків традиційної схеми є те, що вона надзвичайно страждає при щільному розгортанні з високими перешкодами між точками доступу. Це пов'язано з просторовою близькістю сусідніх точок доступу в щільному розгортанні. У таких випадках, як правило, мають дуже низький сигнал через перешкоди від близької точки доступу, що призводить до погіршення продуктивності. Крім того, через те, що вона лише намагається досягти координації

в просторовій області, мережа з кількома точками доступу не має іншого вибору, окрім як терпіти перешкоди спільного каналу через близьке розташування сусідніх каналів один до одного. Крім того, система не має можливості одночасно розглядати альтернативні, більш придатні області для координації в умовах інтерференції між точками доступу. Тому, не може забезпечити необхідну продуктивність зв'язку ефективно та надійно в умовах надщільності. Ефект такої архітектури очевидний при розгляді комунікації між точками доступу, пов'язаних з одним каналом, які страждають від низького сигналу через обмеження координації на основі просторової області, тоді як координація на основі частотної області може бути кращою альтернативою для координації, тим самим забезпечуючи більш високий сигнал. Як наслідок, для розроблення алгоритму важливо мати можливість враховувати умови перешкод розгортання при виборі домену для координації.

Конструкція CSR не підтримує кілька мережевих робіт S-AP. Це пов'язано зі зростаючою складністю координації між великою кількістю АП. Як наслідок, це призводить до подальшого погіршення продуктивності в сценаріях надщільного розгортання, де в передачах з кількома точками доступу беруть участь більше двох точок доступу. Така обмежена, негнучка конструкція погіршує загальну продуктивність мережі в надщільних сценаріях. Отже, конструкція, яка може координувати передачу між великою кількістю точок доступу, має першорядне значення, враховуючи зростаючу щільність мереж WLAN.

Крім того, незважаючи на здатність С-OFDMA успішно усувати перешкоди між BSS шляхом присвоєння кожному BSS RU, що не перекривається, він не є надійним і стійким підходом для надщільного розгортання. Це пов'язано з тим, що доступний канал може бути недостатньо широким, щоб вмістити RU, що не перекривається, для кожного бере участь BSS. В результаті, в сценаріях розгортання з великою кількістю сусідніх точок доступу, що перекриваються, з обмеженою пропускнуою здатністю, M-AP, що покладається виключно на С-OFDMA, не забезпечить високої продуктивності на всіх BSS в мережі.

У зв'язку з недоліками розробки схем координації з декількома АП, положення цієї глави узагальнюються наступним чином:

Запропоновано нову багатовимірну, ситуаційно-орієнтовану схему координації мультиАП. На відміну від існуючих схем координації з декількома точками доступу, які виконують координацію лише в одній області та страждають у певних сценаріях розгортання, запропонований комбінований алгоритм є багатовимірним, оскільки він має можливість розгортати як просторові, так і частотні схеми координації доменів, коли це буде визнано доцільним M-AP з урахуванням ситуації. В результаті, мережа з декількома точками доступу не повинна терпіти неоптимальну стратегію координації та має гнучкість, щоб гарантувати вищий рівень надійності.

Крім того, на відміну від існуючих схем координації з декількома точками доступу, які підтримують обмежену кількість точок доступу, запропонована схема має можливість підтримувати більшу кількість точок доступу, зберігаючи при цьому складність під контролем. Це досягається шляхом розгортання схеми кластеризації, яка ділить загальну мережу з кількома точками доступу на кластери, де кожен кластер розглядається як незалежна мережа з кількома точками доступу. В цьому випадку система завжди передає на повну потужність, навіть якщо це відбувається за рахунок продуктивності всієї мережі. В зв'язку з цим потрібно розробити систему і комбіновану архітектуру.

Загальна мета комбінованого алгоритму полягає в тому, щоб забезпечити мінімально необхідний сигнал, що відповідає необхідній швидкості передачі даних у кожній точці доступу в мережі з кількома точками доступу. Розглянемо мережу з декількома точками доступу, що складається з точок доступу, кожна з них приєднана до кожної точки доступу. Отже, загальна мета може бути виражена як рішення, що для кожного невідомого є обчислювально витратним через наявність проблем з передачею. Крім того, складність зростає зі збільшенням числа точок за рахунок введення застосункових систем. Для досягнення мети розроблений алгоритм спрямований на зниження відповідної складності шляхом розгортання методу кластеризації, який групує точки доступу у кластери другого розміру. Після цього кожен кластер розглядається як окрема мережа з кількома точками доступу, де досягнення мети стає простішим для вирішення через меншу кількість точок доступу, які враховуються, що призводить до меншої кількості невідомих та обмежень.

Іншими словами, кожному кластеру присвоюється номер, що не перекривається, який дозволяє здійснювати передачу між кластерами з кількома точками доступу за допомогою координації частотної області. З іншого боку, внутрішньокластерні передачі координуються через просторову область, коли це необхідно, або частотну область, коли ні. В результаті, координація як частоти, так і просторової області використовуються належним чином, щоб гарантувати певний рівень продуктивності між точками доступу в надщільних розгортаннях без збільшення складності. В результаті задача дослідження може бути переписана так, що схема поділяється на три основні фази: фазу підготовки; фазу налаштування; спрацьовування; фазу передачі. Ця загальна схема слідує тому ж загальному процесу обміну кадрами, що і алгоритм, щоб не збільшувати мінімум застосункових витрат, що є перевагою перед іншими схемами координації. Розглянемо ці три фази.

Фаза підготовки відбувається перед тим, як точка доступу виграє змагання в тендіт точок доступу для користувача і ініціює координацію кількох точок доступу. Основна мета цього етапу полягає в тому, щоб забезпечити кожну точку доступу необхідною інформацією для майбутнього етапу. Відбувається такий перелік дій. Кожна точка доступу збирає можливості координації кількох точок доступу сусідньої точки доступу. В результаті кожна точка доступу буде знати про сусідні точки доступу, які підтримують координацію з декількома точками доступу. Ця інформація передається через точки доступу. Прислухаючись до того, що відбувається передача, кожна точка доступу відстежує сусідні точки доступу, які підтримують координацію з декількома точками доступу. Кожна точка доступу запускає пов'язані з нею для вимірювання втрат шляху від себе та від сусідніх точок доступу. Для того, щоб відбувалися вимірювання втрат шляху, точки доступу транслюють рамку запиту на вимірювання зв'язку, щоб запитувати значення втрат шляху. Поле використовуваної потужності передачі визначає потужність передачі, яку використовує точка доступу, яка передала кадр. Після цього вона повідомляє назад у пов'язану з нею точку доступу індикатор потужності отриманого каналу через рамку запиту на вимірювання каналу. Потім система, відповідно, оцінює втрати шляху.

Проаналізуємо продуктивність розробленої схеми багатовимірної,

комбінованої схеми координації з кількома точками доступу порівняно з сучасними схемами. Використати для такого порівняння можна модель втрати шляху. Для оцінки використати такі показники продуктивності: середня швидкість передачі даних; швидкість передачі даних з точок доступу; відсоток для точок доступу, у яких швидкість передачі даних нижча за мінімально необхідну швидкість; відсоток часу, коли координація на основі частотної області була обрана за розробленим комбінованим алгоритмом. Розглянемо для цього завдання дві основні категорії моделювання: внутрішньокластерне; міжкластерне моделювання.

Внутрішньокластерне моделювання полягає в тому, що наприклад кластер складається з двох точок доступу. Під час моделювання, тоді досліджуються дві основні змінні. Моделюють різну кількість точок доступу на різних каналах для постійних положень системи. Відстань між обома точками доступу була змінною, тоді як кількість точок доступу на каналах була фіксованою для кожної ітерації. Для кожної кількості станцій можна виконати велику кількість ітерацій, де в кожній ітерації змінна симуляції встановлюватиметься випадковим чином. Крім того, середнє арифметичне значення отриманих показників ефективності може бути взято для усунення ефекту викидів. На першому етапі моделювання можна включати кількість станцій як змінну для аналізу продуктивності кожного алгоритму при зміні щільності сигналу. Для кожного сценарію моделювання відстань між точками доступу встановлюється, і відповідно встановлюється кількість каналів для позицій станцій. Тоді, моделюють як правило три сценарії з параметрами. Для оцінки запропонованого алгоритму та порівняння його з існуючими алгоритмами використовувалися різні показники продуктивності. Метриками для моделювання є середня швидкість передачі даних на станцію, відсоток станцій нижче мінімальної швидкості передачі даних, швидкість передачі даних та відсоток часу, протягом якого використовувалася координація частотної області. Показник середньої швидкості передачі даних на станцію обчислює середню швидкість передачі даних на станцію для загальної мережі з кількома точками доступу. Відсоток станцій нижче мінімальної швидкості передачі даних - це показник, який вимірює відсоток станцій, швидкість передачі даних яких нижча за мінімально необхідну швидкість передачі

даних, що є важливим показником, який підкреслює частоту відмов інших алгоритмів і те, наскільки добре комбінований алгоритм досягає мети проектування: гарантувати мінімальний сигнал; швидкість передачі даних для станцій в мережі. Крім того, метрика швидкості передачі даних вимірює швидкість передачі даних станції, яка зазнає найбільших перевантажень. Показник швидкості передачі даних має на меті висвітлити проблеми перевантаження, які виникають під час розгортання системи. Відсоток часу, протягом якого використовувався алгоритм, вимірює, як часто частотна область вибирається в якості внутрішньокластерної, багатоточкової координаційної схеми.

У моделюванні на основі станцій очевидно, що зі збільшенням числа станцій затори стають більш серйозними. Комбінований алгоритм, з іншого боку, не страждає від такої ж проблеми завдяки своїй конструкції, яка дозволяє йому вибирати частотну область для координації. Відсоток ітерацій це коли частотна область використовувалася для координації за запропонованим комбінованим алгоритмом. Ці цифри можуть показати переваги багатовимірної архітектури, що враховує ситуацію, оскільки він дозволяє частіше вибирати частотну область для координації порівняно з просторовою областю, яка страждає в щільних сценаріях. У випадку моделювання на основі точки доступу очевидні тенденції, дуже схожі на моделювання на основі станцій. Комбінований алгоритм перевершує традиційні алгоритми за всіма показниками продуктивності. Однак при більш детальному розгляді результату виникають деякі відмінності. Комбінований алгоритм в основному перевершує на дистанціях менше середніх. За межами цієї точки майже немає перешкод через спадну щільність, і в результаті просторова область вибирається частіше над частотною областю. Це призводить до схожості продуктивності між комбінованим алгоритмом на дистанціях більше середніх. При цьому може бути збільшення середньої швидкості передачі даних на станцію. Це пов'язано з тим, що точки доступу вибирають просторову область замість частотної області. В результаті, при виборі просторового домену, кожна точка доступу може використовувати всю пропускну здатність каналу, на відміну від того, коли вибрано частотний домен. Це також підтримує вибір архітектури, яка надає пріоритет просторовому домену над частотним, оскільки

перший призводить до використання більшої пропускнуої здатності порівняно з другим.

Розглянемо, також, міжкластерне моделювання. Міжкластерні моделювання в мережі характеризуються тим, що складаються з певної кількості станцій з метою вивчення продуктивності кластерної, багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу. Відповідно до кластерної методики, утворюють кластер, а з точок доступу для дослідження утворюють інший кластер. З урахуванням параметрів моделювання обидва кластери відповідно мають спільний канал. Перший кластер, що складається з точок доступу, ділить загальний канал, а аналогічно другий кластер, що складається з досліджуваних точок доступу, ділить другу половину каналу. Крім того, кожен кластер поділяє домен частотою через просторове співіснування. Дві з основних схем координації кількох точок доступу, запропонованих в стандарті 802.11be, це координація на основі просторової області та координація на основі частотної області. У них дозволяється одночасна передача. В результаті налаштування потужностей передачі системи таким чином, щоб вони не заважали один одному. З іншого боку, в системі призначаються додаткові точки доступу, що не перекриваються, щоб уникнути перешкод спільного або суміжного каналу. Незважаючи на поліпшення якості порівняно з стандартом SR 802.11ax, вони швидше все ще страждатимуть від перешкод у надцільних сценаріях, де точки доступу близькі між собою, що є фундаментальним обмеженням координації просторової області. Крім того, координація частотної області страждає при розгортанні, де канал не може вмістити всі досліджувані точки доступу в мережі з декількома точками доступу. Як наслідок, поточні схеми покладаються на єдину область для координації впевних умовах розгортання.

Тому, потрібно розробити комбіновану, багатовимірну схему координації з декількома точками доступу. Комбінована схема повинна надати точкам доступу можливість розгортати координацію як у просторовій, так і в частотній областях, щоб гарантувати більш високий ступінь надійності для забезпечення мінімально необхідної швидкості передачі даних для кожної точки доступу в сценарії розгортання з декількома точками доступу. В результаті мережа з декількома точками

доступу матиме гнучкість, необхідну для того, щоб не допускати неоптимального домену в сценарії.

Саме евристичний, орієнтований на користувача, алгоритм вибору каналів із механізмом звітності на основі кластерів із низькими застосунковими витратами може бути використаний в методі координації точок доступу. Алгоритм використовуватиме просторову кореляційну природу перешкод, що призводить до того, що близькі точки доступу мають схожі умови каналу. В результаті, замість того, щоб кожна точка доступу в мережі звітувала про кожен канал-кандидат, який розглядається точкою доступу, що значно збільшує додаткові витрати на сигналізацію та обчислювальне перевантаження, точка доступу розподіляє робоче навантаження. Система використовує неконтрольований алгоритм кластеризації машинного навчання, щоб згрупувати точки доступу, які знаходяться поруч між собою у кластери, а потім розділити навантаження звітності зворотного зв'язку на всі точки доступу в межах одного кластера. В результаті кожна точка доступу не повинна буде звітувати про весь набір каналів, що розглядаються точкою доступу, тим самим зменшуючи застосункові витрати та надмірність інформації зворотного зв'язку без шкоди для точності. Крім того, потрібен алгоритм стійкості, де система призначатиме твірний елемент кластеру в кожному кластері, яка відповідає за моніторинг обраного каналу та запуск точки доступу для повторного вибору каналу, якщо обраний канал більше не підходить. Така багатовимірна схема координації з декількома точками доступу необхідна для виконання умови надійності: гарантувати певний рівень продуктивності або сигналу для кожної точки доступу, що бере участь у передачі з кількома точками доступу, незалежно від того, чи пов'язана вона з ними або з вторинною точкою доступу. Алгоритм доповнюватиметься фазою налаштування на основі кластера, яка ділить точки доступу на кластери, де міжкластерні передачі координуються через частотну область, а внутрішньокластерні передачі координуються через просторову область, коли це необхідно, і частотну область, коли ні. Завдяки такій багатовимірній конструкції, комбінований алгоритм не повинен мати обмеження координаційної області.

У зв'язку з роботою мереж Wi-Fi в неліцензованому діапазоні перешкоди є

однією з основних загроз для продуктивності сучасних мереж Wi-Fi. В основному це пов'язано з тим, що неліцензований діапазон використовується між кількома технологіями, крім Wi-Fi, такими як пристрої Bluetooth і ZigBee. Крім того, оскільки неліцензований діапазон обмежений з точки зору кількості доступних каналів, нещодавнє збільшення кількості пристроїв Wi-Fi і, як наслідок, зростання мереж Wi-Fi зробили загрозу перешкод більшою, ніж будь-коли.

Тому, потрібен евристичний, орієнтований на користувача алгоритм вибору каналів з кластерним механізмом звітності з низькими витратами. Алгоритм на основі кластерів ділить точки доступу в безпосередній близькості між собою на кластери. В результаті кожен кластер містить точки доступу, які знаходяться близько між собою. Крім того, точки доступу в одному кластері мають схожі умови інтерференції через просторову кореляційну природу інтерференції. Як наслідок, система розподіляє запити на сканування та звітування за всіма каналами-кандидатами між ними в межах кожного кластеру. Отже, незважаючи на зниження витрат на сигналізацію та навантаження, вдається уникнути незначних втрат у якості інформації. Після того, як точка доступу вибирає канал для зв'язку, вона розгортає алгоритм стійкості, щоб гарантувати, що в разі зміни умов перешкод точка доступу матиме можливість вибрати інший канал. Це надає алгоритму вибору каналів динамічний характер. Такий алгоритм працює дуже схоже на алгоритм вибору каналів, зменшуючи при цьому витрати зворотного зв'язку та навантаження на одну станцію. Багатовимірною комбінованою схемою координації з декількома точками доступу розроблена для того, щоб гарантувати певний рівень сигналу для всіх точок доступу на всіх каналах, що беруть участь у передачі кількох точок доступу, незалежно від того, чи пов'язаний вони між собою. Алгоритм розроблений для подолання недоліку щодо фундаментальних обмежень координації в просторовій області. Комбінований алгоритм доповнюється етапом налаштування на основі кластерів, що дає можливість розділяти точки доступу на кластери. Після цього міжкластерні передачі координуються за допомогою координації частотних доменів, а внутрішньокластерні передачі координуються за допомогою просторового домену. В результаті мережа з декількома точками доступу не повинна мати фундаментальне обмеження

координації в одному домені, коли доступний інший, більш підходящий домен.

3.3 Висновки до третього розділу

Розроблено алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi, особливістю якого є урахування перекриття зон дії та каналів зв'язку, що в результаті дасть змогу побудувати кластери точок доступу, які мінімізують інтерференцію.

Розроблено евристичний, орієнтований на користувача алгоритм вибору каналів з кластерним механізмом звітності з низькими витратами. Алгоритм на основі кластерів ділить точки доступу в безпосередній близькості між собою на кластери. В результаті кожен кластер містить точки доступу, які знаходяться близько між собою. Крім того, точки доступу в одному кластері мають схожі умови інтерференції через просторову кореляційну природу інтерференції. Як наслідок, система розподіляє запити на сканування та звітування за всіма каналами-кандидатами між ними в межах кожного кластеру. Отже, незважаючи на зниження витрат на сигналізацію та навантаження, вдається уникнути незначних втрат у якості інформації. Після того, як точка доступу вибирає канал для зв'язку, вона розгортає алгоритм стійкості, щоб гарантувати, що в разі зміни умов перешкод точка доступу матиме можливість вибрати інший канал. Це надає алгоритму вибору каналів динамічний характер. Такий алгоритм працює дуже схоже на алгоритм вибору каналів, зменшуючи при цьому витрати зворотного зв'язку та навантаження на одну станцію. Багатовимірною комбінованою схемою координації з декількома точками доступу розроблена для того, щоб гарантувати певний рівень сигналу для всіх точок доступу на всіх каналах, що беруть участь у передачі кількох точок доступу, незалежно від того, чи пов'язаний вони між собою.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМУНІКАЦІЇ В СХЕМІ КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI

4.1 Протоколи комунікації в схемі координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Протоколи контролю використовуються в мережах, визначених програмним забезпеченням, дозволяють керувати контрольним управлінням та управлінням площиною даних. Однак ці протоколи вводять додатковий трафік та затримку між мережевими контролерами та комутаторами. Незважаючи на поточні уявлення про контрольні додаткові витрати, вони є суттєвими. На додаток до високої реакційної здатності до вхідних потоків, потреба у розподілі ресурсів та детермінованої затримки обміну повідомленнями потребує глибокого розуміння та моделювання кількості трафіку контролю та його впливу на затримку. Перемикання програмного забезпечення полегшує розробку мереж, що дозволяє використовувати його як для обробки даних, так і для комутації пакетів. Незважаючи на ці переваги, характеристика та забезпечення детермінованих показників за допомогою перемикачів важче, порівняно з фізичними перемиканнями приладів. Зокрема, досягнення детермінованих показників має важливе значення для прийняття перемикання програмного забезпечення в критичних місцях застосунків, особливо тих, що розгорнуті в архітектурах обчислювальних та туманних обчислень. Розглядатимемо мережу додаткових витрат різних конфігурацій комутаторів на тестовій моделі, щоб передбачити очікувані додаткові витрати на довільні конфігурації комутатору. Схеми трафіку перемикання контролеру не є складними, і вони можуть бути точно модельовані для обчислення використання пропускну здатності зв'язку з перемиканням контролеру. Вплив відкритих конфігурацій планувальників пакетів на пропускну здатність та передбачувану затримку пакетів є суттєвою. Затримка та передбачуваність залежать від впровадження механізму планування пакетів та що планувальники пакетів, які використовуються в ядрі, зосереджуються на різних аспектах перемикання продуктивності.

Швидкість трафіку характеризує використання пропускну здатності, тоді як розмір пакету та швидкість пакетів використовуються для визначення черги та

затримок передачі. Розмір і швидкість пакетів є важливими змінними для визначення затримки доставки повідомлень за допомогою алгоритмів планування, таких як зважена справедлива черга та ієрархічний сегмент токенів. Розмір пакету особливо важливий, оскільки він використовується для розрахунку ефективної швидкості черги потоку. Проаналізуємо ці показники з урахуванням різної кількості правил/черг потоку та різних конфігурацій правил потоку. Розроблена архітектура тестового стенду затримки потрібна, щоб виміряти затримку комутації пакетів. На тестовому стенді, що складається з трьох машин: джерела трафіку; програмного комутатору; пункту призначення трафіку. Джерело трафіку надсилає трафік UDP і TCP до місця призначення трафіку. Для потоків UDP з фіксованою пропускну здатністю він підтримує специфікацію пропускну здатності потоку UDP. Також, треба модифікували кількість черг, виділену пропускну здатність кожної черги та тип потоків даних у кожній черзі. Пакети захоплюються в портах виходу і входу джерела трафіку і пункту призначення трафіку відповідно. Щоб забезпечити синхронізацію значень часових позначок, джерелом трафіку та місцем призначення трафіку є віртуальні машини, що працюють на одному комп'ютері, і тактова частота цих двох віртуальних машин синхронізується з годинником гіпервізора. Ця конфігурація дозволяє вимірювати та аналізувати значення затримки. Протокол OpenFlow дозволяє здійснювати віддалене управління таблицями правил потоку на комутаторах за допомогою використання різних типів повідомлень, таких як запит конфігурації, узгодження версій і повідомлення про оновлення статусу. Наприклад, може використовуватися для запиту інформації про стан від комутатору. Кожна функція вимагає свого власного запиту та відповіді, і тому контролеру потрібно кілька повідомлень, щоб отримати повний знімок стану перемикача. Повідомленнями, що мають відношення до цієї роботи, будуть повідомленнями, які містять інформацію про черги та потоки. Цей протокол дозволяє мережевому застосунку налаштовувати непотокові компоненти комутатору, такі як черги, планувальники пакетів і мости. Він виконує такі операції, як вставка, оновлення та видалення, як частина запитів на віддалений виклик процедур до комутатору. Зріз пропускну здатності здійснюється шляхом налаштування планувальників пакетів на комутаторі. У поєднанні з

правилами потоку це дозволяє спрямовувати потоки даних у черги, які забезпечують обмеження пропускної здатності. Релевантними таблицями в базі даних комутаторів для керування чергою є порт. Для реалізації такої схеми використовують контролер, який підтримує різноманітні протоколи. За допомогою його інтерфейсу отримують доступ до багатьох необхідних протоколів, що використовуються для конфігурації мережі. Програмний комутатор з відкритим вихідним кодом сумісний з різними гіпервізорами та контейнерними системами. Він відрізняється високою програмованістю і конфігурується за допомогою протоколів. Виконуватимемо нарізку пропускної здатності на комутаторах за допомогою їх планувальників пакетів. Планувальники пакетів, які використаємо, повинні бути налаштовані на формування потоків за допомогою мінімальної гарантованої швидкості та/або параметрів максимальної обмеженої швидкості. У поєднанні з правилами потоку, які направляють пакети в черги, то потоки даних формуються з певними мінімальними і максимальними темпами. Для них використаємо планувальник пакетів, оскільки він широко використовується і доступний.

Модуль контролю трафіку це класна дисципліна масового обслуговування, яка підтримує ієрархічне формування трафіку. Його механізми контролю швидкості реалізовані за допомогою алгоритму фільтру сегменту токенів, а його ієрархічна система запозичення токенів дозволяє батьківським класам ділитися токенами зі своїми дочірніми класами. Ця система спільного використання токенів дозволяє кожному класу встановлювати гарантовану мінімальну ставку, а також ділитися надлишковою доступною пропускною здатністю зі своїми класами. В ній використовується планувальник пакетів, заснований на алгоритмі. Він використовує сегмент токенів для контролю швидкості та надає можливості формування трафіку, такі як гарантована мінімальна та максимальна частота черги. Механізми контролю швидкості значно відрізняються, що призводить до різної затримки та пропускної здатності для черг з однаковою виділеною швидкістю. Ієрархічна реалізація алгоритму фільтру сегмента токенів, що означає, що коли пакет надходить на початок черги, а вільних токенів немає, то пакет чекає в черзі, поки токени не стануть доступними, після чого пакет стає в чергу та відправляється. З іншого боку, коли

пакет надходить на чолі черги, сегменти токенів перевіряються на наявність токенів, і якщо токенів для пакета не вистачає, то пакет відкидається. Найбільш істотним є те, що ця різниця в поведінці призводить до різних ефективних ставок черги. Ефективна швидкість черги впливає на затримку потоку і пропускну здатність.

Розглянемо і охарактеризуємо зв'язок між вимикачем і контролером. Спочатку представляємо емпіричну оцінку керуючого трафіку з урахуванням конфігурації потокової таблиці та черги. Встановлення правила потоку може бути реактивним або проактивним процесом. Хоча для проактивного встановлення правила потоку на комутатор потрібне лише одне повідомлення, звичайний сценарій передбачає реактивний обмін двома повідомленнями між комутатором і контролером. Повідомлення генерується комутатором і відправляється контролеру, коли пакет надходить на комутатор і виконується хоча б одна з наступних умов: пакет не відповідає жодним існуючим правилам потоку на комутаторі; пакет відповідає правилу потоку, яке явно визначає генерацію повідомлення; значення пакету неприпустиме. У відповідь на повідомлення від контролера на комутатор відправляється повідомлення, що містить дані про правила потоку. Структура повідомлення містить два поля змінного розміру. Поле використовується для вказівки контексту пакету, який надійшов на комутатор і викликав повідомлення, а поле даних передає сам пакет для подальшої перевірки контролером. Коли повідомлення про пакет генерується за допомогою пропуску таблиці потоку на перемикачі, то хоча існує чотири потенційні контекстні поля, лише одне включено в заголовок пакету, а решта завжди використовують свої значення за замовчуванням. Коли пропуск у таблиці потоку викликаний вхідним пакетом, то розмір повідомлення може бути представлений певною кількістю байтів, що формуватиме розмір. Потім контролер генерує повідомлення для додавання нового правила потоку до таблиць перемикача. Аналогічно пакет з повідомлення має два поля змінного розміру. Розглянемо варіації у конфігураціях полів відповідності. Тому включаємо лише стандартну інструкцію виведення-порту. Загальні конфігурації полів відповідності і розмір пакету використовуються для налаштування правила потоку з цими параметрами на комутаторі.

Встановимо різні правила потоку на перемикач для вимірювання верхніх витрат повідомлень опитування між контролером і комутатором. Ці повідомлення опитування спостерігаються для всіх узагальнених конфігурацій перемикачів. Конкретні взаємозв'язки між конфігурацією перемикачів впливають на додаткові витрати та на керування. Кожне правило потоку, містить збіг, адреси джерела та адреси призначення. Правило потоку з цією структурою представлено у кожному повідомленні потоку. Однак, не всі правила потоку вимагають однакового обсягу даних для передачі інформації про правила. Щоб виміряти навантаження на мережу, спричинене опитуванням оновлення статусу, змінюємо кількість правил потоку, встановлених на комутаторі, між правилами потоку, і фіксуємо мережевий трафік між комутатором і контролером швидкості передачі даних. Наявна залежність між пропускною здатністю керуючого трафіку і кількістю правил потоку серед витрат. Величина використовуваної пропускної здатності зростає лінійно порівняно з кількістю потоків. Трафік в основному складається з повідомлень від комутатора до контролеру для передачі поточного стану комутатора. Швидкості передачі даних від комутатора до контролеру безпосередньо корелює з обсягом даних, необхідних для передачі інформації правила одного потоку, і частотою опитування контролеру. Швидкість трафіку від контролеру до комутатора демонструє лише незначне збільшення і не має значного впливу стану перемикача.

Розглянемо вплив середнього розміру пакету. Функція середнього розміру пакету є асимптотичною функцією щодо кількості правил потоку на комутаторі. Середній розмір пакету в двох напрямках трафіку істотно відрізняється. Це пов'язано з тим, що розмір більшості пакетів даних у напрямку перемикачання на контролер є максимальною одиницею передачі, тоді як трафік в іншому напрямку здебільшого складається з невеликих повідомлень. Криві середнього розміру пакету в обох напрямках є асимптотичними, при цьому середній розмір пакету трафіку в напрямку від контролера до комутатора наближається до розміру пакета TCP ACK, а середній розмір пакета трафіку в напрямку перемикачання до контролера наближається до байтового MTU.

Розглянемо вплив різних конфігурацій полів на правила потоку. Будемо

варіювати правила потоку, що виштовхуються на перемикач, у специфіці їхніх полів матчу. Варіації вказаних полів відповідності варіюються від відповідності лише вихідній IP-адреси до відповідності конкретним IP-протоколам з конкретних машин. Використаємо вісім поширених типів конфігурацій полів. Збільшення кількості полів відповідності в кожному правилі потоку збільшує обсяг даних, необхідних для передачі інформації про стан від комутатора до контролера через структури. Це підкреслює переваги простіших правил потоку, які вимагають менше даних для передачі між комутатором і контролером.

У системі правила потоку налаштовуються через протокол, а все інше в базі даних комутаторів налаштовується окремо, включаючи черги та дисципліни масового обслуговування. Припускаючи, що дисципліни черги вже налаштовані на кожному відповідному порту, додавання черги до комутатора передбачає обмін трьома повідомленнями між контролером і комутатором. Від контролера до комутатора надходять два повідомлення: одне повідомлення для додавання черги до бази даних перемикачів; інше повідомлення для додавання нової черги до дисципліни черги. Обидва повідомлення від контролера до комутатора є діями вставки як частини запиту. Після того, як ці повідомлення були отримані комутатором, комутатор відповідає запитом для інформування контролера про зміни, внесені до його бази даних. На відміну від правил потоку, комутатор і контролер не обмінюються періодично оновленнями статусу після того, як черга була налаштована. Будь-які оновлення статусу черги обробляються за допомогою повідомлень.

У тестовому стенді кожна черга, що надсилається до комутатора, побудована з використанням ідентичної структури. Всього створюється велика кількість черг і переміщається на комутатор з певним кроком. Кожна з вказаних черг представлена байтами в повідомленні. Метод захоплення пакетів для черг аналогічний методу захоплення пакетів для правил потоку: дані контрольного трафіку збираються для кожного стану, де комутатор має в своїй базі даних черги. Залежність між кількістю черг в базі даних перемикачів і додатковими витратами є суттєвою. Швидкість передачі даних має лінійну тенденцію, при цьому більша частина даних передається в напрямку перемикання на контролер. Однак, оскільки оновлення статусу черги

вимагає менше байтів, ніж правило потоку, то додаткові витрати на мережевий трафік при передачі інформації про стан черг значно менші, ніж додаткові витрати трафіку при передачі інформації за правилами потоку проти середнього розміру пакету. Функція середнього розміру пакета керуючого трафіку від контролера до комутатора аналогічна асимптотичній функції. Однак, оскільки обсяг інформації, пов'язаної з чергою, менше, ніж обсяг потоку, то асимптота підходить до асимптоти менш агресивно. Якщо порівнювати черги з правилами потоку, то середній розмір пакета передачі інформації про черги буде меншим, тоді як середній розмір пакета передачі інформації правил потоку буде більшим. У зв'язку з асимптотичним характером функції середнього розміру пакету, більша кількість правил потоку і черг в комутаторі має все менший вплив на середній розмір пакету. Необхідно створити набір узагальнених моделей на основі емпіричного аналізу системи комутатор-контролер, які можуть бути використані для прогнозування реалістичних керуючих витрат. Ці моделі включатимуть змінні, отримані в ході емпіричного спостереження.

Повідомлення про оновлення статусу перемикача надходять через регулярні проміжки часу і розмір повідомлень з потоком змінюється в залежності від кількості та конфігурації правил потоку на комутаторі. Однак розмір черги варіюється лише в залежності від кількості черг на комутаторі. Дані контрольного трафіку є періодичними, бо середній розмір пакету еквівалентний середньому розміру пакета всього потоку. Звідси вилучення виразу для середнього розміру пакета складається з обчислення кількості даних за пакет і кількості пакетів за пакет, а потім об'єднання їх для вираження загального середнього розміру пакета. Таким чином, забезпечують основу для прогнозування керуючого трафіку від комутатора до його контролера при будь-якому довільному правилі потоку або конфігурації черги. Тоді, прогнозують контрольний трафік над додатковими витратами для кожного комутатора в мережі і вони застосовні для топологій з кількома перемикачами.

Таким чином, проаналізовані характеристики керуючого трафіку між комутатором і контролером. Кількість керуючого трафіку безпосередньо корелює зі складністю конфігурацій комутаторів. За ними можна передбачити пропускну здатність. Проаналізуємо основні механізми пропускну здатності, щоб визначити

ефективні показники черги. Це дозволить прогнозувати затримку перемикання в сценаріях зрізу пропускної здатності.

4.2 Система комутації пакетів

У системі комутації пакет зазнає трьох типів затримки: затримки передачі; затримки обробки; затримки в черзі. Затримка передачі безпосередньо пов'язана зі швидкістю передачі і може бути легко розрахована. Затримка обробки викликана різними факторами, включаючи копіювання пакета в різні черги та з них, пошук рішення про пересилання пакета в таблицях або очікування операцій апаратного введення-виведення. Оскільки апаратні комутатори призначені виключно для однієї функції, затримка обробки пакетів в апаратному комутаторі стабільно низька. З іншого боку, затримка обробки програмних перемикачів зазвичай вища і з більшою статистичною варіативністю. Вибір планувальника пакетів також впливає на затримку обробки. Програмні комутатори жертвують затримкою обробки в обмін на більшу гнучкість. Затримка в черзі визначається як час, витрачений пакетом в черзі комутатора, очікуючи передачі. Ця затримка залежить від швидкості черги, швидкості потоку та планувальника пакетів. У кожному програмному комутаторі кожен пакет повинен проходити три черги: чергу вхідного потоку, чергу потоку на вихід; чергу планувальника пакетів. У цій системі пропускна здатність обмежена чергою з найнижчою швидкістю, яка зазвичай є чергою планувальника пакетів, виділеної користувачем. В результаті, пакет витрачає найбільше часу на очікування в черзі планувальника пакетів, оскільки затримка черги, з якою стикається пакет, експоненціально зростає, коли швидкість введення черги наближається до швидкості обслуговування черги. Ця затримка в черзі відповідає тенденції черги, і що за наявності достатніх знань системи можна передбачити затримку.

Важливим фактором у прогнозуванні затримки пакетів через будь-яку систему масового обслуговування є поведінка черги. Планувальники пакетів виводять трафік зі своїх черг з обмеженою швидкістю. Незважаючи на те, що черги з обмеженою швидкістю розподіляються зі значеннями біт/с або байт/с, планувальник пакетів не

виводиться з черги такими малими кроками. Поведінка черги варіюється в залежності від того, як реалізований планувальник пакетів, і навіть різні планувальники пакетів з однаковими параметрами черги поводяться по-різному. Ця змінна призводить до того, що пакети зазнають різних значень затримки в черзі, навіть якщо виділені швидкості черги ідентичні. При збільшенні числа пакетів в кожному трафіку, латентність всього пакету збільшується ступінчасто. Це вказує на те, що система виводить пакети зі своїх черг серіями пакетів, а не по одному. Аналіз затримок окремих пакетів показує, що затримки кожного пакета в пакетах згруповані в сегменти, хоча існують невеликі відмінності в розмірах групування для кожного сегмента черги. Схема групування справедлива для серій будь-якого розміру, незалежно від того, наскільки великий пакет, пакети завжди вишиковуються в групи фіксованого розміру. Використовуючи цю інформацію, екстраполюємо, що ефективна норма черг повинна розраховуватися в одиницях пакетів.

Знання про поведінку затримки надають пристроям можливість надсилати повідомлення, які використовують той факт, що затримка пакетного повідомлення дорівнює затримці повідомлення з великої кількості пакетів. Спочатку доставляється повідомлення, яке не можна використовувати, оскільки дані повідомлень ще не отримано. При певній поведінці програмних перемикачів генерується два повідомлення: одне для даних, які передаються першими; одне для команд, що передаються другим. Як тільки дані отримані сервером, то він може почати обробку даних, а коли надійде команда, то сервер може негайно виконати дію. Тому, це рішення забезпечує мінімальну затримку та краще використання ресурсів. Аналогічний метод може бути використаний щодо зв'язку контролер-комутатор. Щоб забезпечити своєчасну доставку та виконання команд, контролер може керувати впорядкуванням відправлених пакетів на основі типу та розміру команди. Затримка черги при перемиканні слідує тренду. Щоб виміряти зв'язок між затримкою пакетів у потоці ТСП і частотою черги потрібно генерувати потік ТСП через чергу в комутаторі з обмеженою швидкістю. Швидкість потоку ТСП природним чином зростає, поки він не виявить втрату пакетів, спричинену обмежувачем швидкості в програмному комутаторі. При розрахунку очікуваної затримки швидкість черги має бути

представлена через кількість даних, які виводяться в чергу в одному екземплярі, тобто ефективну швидкість черги.

Таким чином, замість того, щоб обчислювати очікувану затримку за допомогою значення параметрів черги, можна обчислювати очікувану затримку за допомогою швидкості черги в одиницях пакетів. Знання про середній розмір пакету є важливими, оскільки можна поєднати середній розмір пакету, бітову швидкість черги та поведінку черги планувальника пакетів для створення ефективних значень швидкості черги. Очікувану затримку можна обчислити за допомогою параметрів швидкості черги та коефіцієнту використання черги. Зв'язок між частотою черги та спостережуваною затримкою це те, що очікується від системи масового обслуговування. Прогнози, засновані на спостережуваній пропускній здатності і знаннях планувальника пакетів, є точними. Для їх отримання генерують значення порівнюючи спостережувану пропускну здатність на вихідному порту джерела трафіку та виділену швидкість черги. Спостережувана пропускну здатність витягується із захоплень в порту виходу джерела трафіку та обчислюється шляхом перетворення одиниць частоти кожної черги з бітів в секунду при групуванні пакетів. Враховуючи, що невеликі варіації коефіцієнта використання черги значно впливають на прогнозування затримки, результати прогнозування затримки будуть тоді обґрунтованими. Для потоків, отриманих пропускну здатністю, затримка в черзі є найбільш значною частиною загальної затримки і вона перебиватиме затримки передачі. Затримка передачі на лінії для одного пакету становить порядку декількох мікросекунд, тоді як спостережувані затримки перемикачів до чотирьох порядків більші. Поточні схеми розподілу завдань або ігнорують затримку як параметр запиту завдання, або припускають, що мережеві затримки складаються лише з тривіально розрахованих затримок передачі. На противагу цьому, запропонований підхід дозволяє прогнозувати затримку зв'язку, що може бути використано для вирішення вимог різних завдань у системах периферійних та туманних обчислень. Контролер може точно застосовувати схеми зрізу пропускну здатності, які задовольняють очікувану затримку зв'язку між периферійними пристроями та комутаторами. Крім того, щоб налаштувати комутатори в межах затримки, контролер може застосовувати методи

зрізу пропускної здатності вздовж усіх шляхів контролер-комутатор. Виділена частота черги та ефективна частота черги не корелюють безпосередньо. Хоча швидкість передачі даних на вихід збігається з виділеною швидкістю, а швидкість, з якою пакети видаляються з черги, залежить від частоти процесора. Доступність токенів для обмеження швидкості, з якою пакети видаляються з черги, використовує наявність токенів, щоб вирішити, які дії слід виконати. Якщо на момент виходу пакета з черги в сегменті є токени, пакет передається. Якщо для пакета недостатньо токенів, то пакет відкидається. Сегмент токена заповнюється з виділеною швидкістю черги, отже, обсяг даних, що надсилаються, обмежений цим значенням. Такий підхід призводить до дуже високої швидкості черги для всіх черг, а ефективна швидкість черги становить близько кількох Гбіт/с. Оскільки швидкість потоку наближається до ефективної швидкості черги, тоді це значення набагато ближче до нуля, оскільки ефективна швидкість черги набагато вища, ніж швидкість потоку. Це призводить до того, що пакети витрачають значно менше часу на очікування в чергах планувальника пакетів. Хоча величина зменшення затримки варіюється в залежності від виділеної частоти черги та швидкості лінії, це показує, що значна частина затримки, яку відчувають пакети, які проходять обмежені за швидкістю черги пов'язані з часом, витраченим на очікування в черзі планувальника пакетів. Механізм контролю швидкості здатний уникнути цих тривалих затримок у черзі, водночас маючи можливість точно обмежувати швидкість трафіку до виходу.

Механізми контролю швидкості досягають однієї і тієї ж мети в обмеженні швидкості трафіку, який направляється на вихідний канал. Хоча відмінності в реалізації мають значні наслідки для затримки, іншим наслідком, який є не менш важливим, є вплив планувальника пакетів на ефективність використання ресурсів. Однією з основних цілей при розподілі завдань на периферії є ефективне та результативне використання ресурсів, що для мережевих ресурсів зазвичай досягається за допомогою механізмів зрізання пропускної здатності та контролю швидкості. Планувальники пакетів здатні точно обмежувати швидкість черги. Однак вибір каналів для точок доступу може призвести до відмови від усіх пакетів, які перевищують виділену швидкість черги, і є компромісом між затримкою та

ефективним використанням пропускної здатності.

Розглянемо дані про швидкість ретрансляції та розмір перевантаження. Обмеження швидкості за допомогою спричиняє значно більше повторних передач. Обмеження швидкості призводить до повторних передач для мережевих адаптерів. Це вказує на те, що для трафіку підтримка вихідної пропускної здатності з комутатора вимагає додаткових обсягів трафіку ретрансляції, через велику кількість пакетів, які він відкидає. Хоча система здатна перемикає окремі пакети з меншою затримкою, але висока швидкість скидання/повторної передачі пакетів негативно впливає на затримку повідомлень програми. Прикладний рівень не залежить від затримки окремих пакетів, а скоріше залежить від затримки повідомлень, які можуть складатися з кількох пакетів. У ситуації з швидкістю ретрансляції повідомлень на великому прикладному рівні з великою ймовірністю будуть повторно передаватися та сповільнюватися пакети через неефективність координації точок доступу.

Потоки з обмеженою швидкістю мають набагато менші розміри вікна перевантаження, ніж потоки, які обмежені швидкістю. Це пов'язано з скиданням всіх пакетів, які перевищують виділену швидкість черги, і є надзвичайно обмеженим для розміру вікна перевантаження. Щоразу, коли пакет скидається та повторно передається, вікно перевантаження цього з'єднання зменшується вдвічі. Для потоків з високою швидкістю ретрансляції, подібних до тих, які отримуються за допомогою системи, вікна перевантаження сильно обмежені і не можуть зростати через постійні скидання пакетів і подальші коригування розміру вікна. Часте регулювання розміру вікна перевантажень також призводить до стрибків і провалів пропускної здатності потоку, що негативно впливає на передбачуваність затримки. Таким чином, повідомлення прикладного рівня, які надсилаються, завжди мають елемент непередбачуваності через високу швидкість ретрансляції, тоді як повідомлення, надіслані після координації точок доступу, цього не роблять. Оскільки система працює повністю в просторі користувача, то досягає своєї високої продуктивності за рахунок постійного споживання принаймні одного ядра процесора. Для високопродуктивних випадків використання використовується окреме ядро для кожного порту, в результаті чого кілька ядер процесору повністю виділені для

запуску шляху даних у просторі користувача. У недорогих і енергозберігаючих сценаріях периферійних і туманних обчислень це не бажано, особливо порівняно, який споживає менше одного процесорного ядра, але при цьому перемикаючи трафік із сотнями правил потоку та черг. Хоча затримку перемикавання можна передбачити за допомогою моделі масового обслуговування, але система не може цього зробити через відмінності в механізмах планувальника пакетів.

Точне моделювання керуючого трафіку має важливе значення для розподілу ресурсів у системах периферійних, туманних і хмарних обчислень. Контроль трафіку над витратами, коли комутатори включають різні стани таблиці потоку та конфігурації черги є важливим в контексті координації точок доступу. Аналіз цих додаткових витрат показав, що загальна пропускна здатність і середня швидкість пакетів контрольного трафіку безпосередньо корелюють з кількістю активних потоків, правил і черг. Наявний незначний вплив контрольних перевантажень трафіку на управління ресурсами та ефективне проектування мережі. Планувальники пакетів впливають на затримку перемикавання та ефективність ресурсів. Моделі для прогнозування затримки системи масового обслуговування, які можна знайти в планувальнику пакетів, потрібно закладати окремими модулями в саму розроблювану систему. Поведінка планувальника пакетів може бути використана для прогнозування затримки пакетів потоків. Таким чином, отримані результати є основою для побудови програмної системи координації точок доступу в мережі Wi-Fi з детермінованою затримкою керуючого трафіку, які можуть бути спеціально побудовані з використанням недорогого обладнання. А також, можуть бути використані для проектування мереж зі зменшеною та передбачуваною затримкою контрольного трафіку. Зокрема, ретельно керуючи топологією мережі на основі шляху зв'язку комутатор-контролер, можна зменшити обсяг даних керування. Крім того, в будь-якій заданій топології мережі затримку трафіку можна передбачити шляхом поєднання моделей контролю трафіку з ефективним аналізом швидкості черги планувальників пакетів. Конструктивні рішення, які дозволяють досягати низької затримки, здійснюються за рахунок неефективного використання пропускної здатності, нестабільності пропускної здатності та зниження передбачуваності затримки. Ця

інформація особливо важлива для проектування мереж з врахуванням конкретних показників ефективності. Крім того, ця інформація може бути використана для розробки планувальників пакетів, які поєднують в собі потрібні властивості. Наприклад, новий планувальник пакетів, який прагне встановити обмеження затримки, а також досягти надійності потоку, може ставити пакети в чергу відповідно до швидкості черги, а також динамічно регулювати довжину черги таким чином, щоб пакети, які не відповідають вимогам затримки пакетів, відкидалися. Таким чином, можна реалізувати переваги використання буферів черги, а також утримувати затримку в черзі у встановлених межах.

4.3 Метод координації точок доступу в мережі Wi-Fi

Метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах передбачає оптимізацію їхньої роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

Основні кроки цього методу з урахуванням зазначених параметрів:

- 1) аналіз топології мережі;
- 2) вибір каналів та мінімізація інтерференції;
- 3) оптимізація відстані між точками доступу;
- 4) регулювання потужності та перекриття зон покриття;
- 5) кластеризація точок доступу;
- 6) оцінка пропускної здатності каналів зв'язку;
- 7) оптимізація черг до точок доступу.

Аналіз топології мережі передбачає визначення типу мережі: інфраструктурна; mesh-мережа; комбінована. Також, визначення зон покриття та місць встановлення точок доступу і оцінювання перешкод, тобто наявність стін, меблів, електронних пристроїв тощо.

Вибір каналів та мінімізація інтерференції передбачають використання неперекривних каналів (1, 6, 11 у 2,4 ГГц або автоматичний вибір у 5 ГГц), виявлення та усунення перекриття каналів між сусідніми точками доступу, динамічне керування

каналами (DFS – Dynamic Frequency Selection для 5 ГГц).

Оптимізація відстані між точками доступу передбачає встановлення точок доступу на оптимальній відстані (10–30 м у приміщеннях), використання аналізаторів сигналу (Ekahau, NetSpot, Wi-Fi Analyzer) для оцінки рівня RSSI.

Регулювання потужності та перекриття зон покриття передбачає виконання коригування потужності передавачів для запобігання надмірному перекриттю, використання технологій переведення пристроїв у 5 ГГц і рівномірного розподілу навантаження.

Кластеризація точок доступу полягає в групуванні точок доступу у кластери для централізованого керування і використання контролерів або хмарних платформ для моніторингу (Cisco, Aruba, Ubiquiti).

Оцінка пропускної здатності каналів зв'язку полягає у виконанні визначення максимального навантаження на точку доступу та розподілі клієнтів між 2,4 ГГц і 5 ГГц для балансування навантаження.

Оптимізація черг до точок доступу потребує використання QoS (Quality of Service) для пріоритезації трафіку, налаштування максимальної кількості одночасних клієнтів на точці доступу, впровадження 802.11e/WMM для пріоритетного обслуговування голосового та відеотрафіку.

Ці кроки допомагають створити ефективну та стабільну Wi-Fi-мережу з мінімальними затримками та рівномірним розподілом ресурсів між користувачами.

Таким чином, розроблено метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах, особливістю якого є групування точок доступу в кластери з врахуванням перекриття ними областей території, врахування завантаженості каналів, пропускної здатності каналів та черг до каналів, який дав змогу розробити систему, в якій оптимізовано роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Проаналізовані характеристики керуючого трафіку між комутатором і

контролером та основні механізми пропускної здатності, щоб визначити ефективні показники черги. Це дозволило прогнозувати затримку перемикавання в сценаріях зрізу пропускної здатності.

Розроблено метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах, особливістю якого є групування точок доступу в кластери з врахуванням перекриття ними областей території, врахування завантаженості каналів, пропускної здатності каналів та черг до каналів, який дав змогу розробити систему, в якій оптимізовано роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено новий метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах та отримано такі результати.

1. Проаналізовано відомі методи та засоби забезпечення координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.
2. Розроблено метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.
3. Розроблено модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.
4. Розроблено алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Deng L., Li D., Cai Z. et al. Smart IoT information transmission and security optimization model based on chaotic neural computing. *Neural Comput & Applic* 32, 16491–16504 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04162-4>
2. Zhang H., Shi Z., Chadli M. et al. Guest editorial: Networked cyber-physical systems: Optimization theory and applications. *Peer-to-Peer Netw. Appl.* 2019. 12, Pp. 1624–1626. <https://doi.org/10.1007/s12083-019-00811-6>.
3. Imputato P., Avallone S., Magrin D. Multi-AP coordination in Wi-Fi 7 exploiting time resources sharing. 2022. Pp. 166-171. 10.1109/MeditCom55741.2022.9928663.
4. Au E. Specification Framework for TGbe. IEEE 802.11-19/1262r11, Jul. 2020.
5. Bertizzolo L. et al., “CoBeam: Beamforming-based spectrum sharing with zero cross-technology signaling for 5G wireless networks,” to appear in Proc. *INFOCOM* 2020, arXiv: 2002.06969. Feb. 2020.
6. Huanhuan C., Bo L., Mao Y., Zhongjiang Y. Coordinated TDMA MAC Scheme Design and Performance Evaluation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be. 10.1007/978-3-030-69514-9_24. 2021.
7. Deng, C., et al. IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: new challenges and opportunities. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2020. 22(4). Pp. 2136–2166.
8. López-Raventós, A., Bellalta, B. Multi-link operation in IEEE 802.11 be WLANs. *IEEE Wirel. Commun.* 2022. 29(4). Pp. 94–100.
9. Galati-Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11 bn ultra high reliability. *IEEE Commun. Mag.* 2024, 62(8). Pp. 126–132.
10. Huang K., et al. Mutli-link channel access schemes for IEEE 802.11 be extremely high throughput. *IEEE Commun. Standards Mag.* 2022. 6(3). Pp. 46–51.
11. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11 be extremely high throughput: the next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11 ax. *IEEE Commun. Mag.* 2019, 57(9), Pp. 113–119.
12. Wei D., Cao L., Gao X., Yin H. Non-primary channel access in IEEE 802.11

UHR: comprehensive analysis and evaluation. *arXiv preprint arXiv:2403.11300* (2024)

13. Badeel R., Subramaniam S. K., Muhammed A., Hanapi Z. M. A Multicriteria Decision-Making Framework for Access Point Selection in Hybrid LiFi/WiFi Networks Using Integrated AHP–VIKOR Technique. *Sensors*. 2023. 23(3), 1312.

<https://doi.org/10.3390/s23031312>

14. Hsu C.-F., Ho Y.-C., Pan W.-J., Jhang J.-M., Su Y.-W. On Energy-Efficient Clustering in User-Centric Li-Fi Networks. *In Proceedings of the ICC 2021—IEEE International Conference on Communications, Montreal, QC, Canada, 14–23 June 2021*. Pp. 1–6.

15. Shaaban R., Faruque S. Cyber security vulnerabilities for outdoor vehicular visible light communication in secure platoon network: Review, power distribution, and signal to noise ratio analysis. *Phys. Commun.* 2020, 40, 101094.

16. Bian R., Tavakkolnia I., Haas H. 15.73 Gb/s Visible Light Communication with Off-the-Shelf LEDs. *J. Light Technol.* 2019, 37. Pp. 2418–2424.

17. Modepalli K., Parsa L. Active Pulse Shaping Circuit for Bandwidth Enhancement of High-Brightness LEDs using GaN Devices. *In Proceedings of the Thirty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2018)*, San Antonio, TX, USA, 4–8 March 2018. Pp. 3471–3476.

18. Ma W., Zhang L. QoE-driven optimized load balancing design for hybrid LiFi and WiFi networks. *IEEE Commun. Lett.* 2018, 22. Pp. 2354–2357. Available online: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7136231/>

19. Badeel R., Subramaniam S.K., Hanapi Z.M., Muhammed A. A Review on LiFi Network Research: Open Issues, Applications and Future Directions. *Appl. Sci.* 2021, 11, 11118.

20. Murad S.S., Yussof S., Hashim W., Badeel R. Three-Phase Handover Management and Access Point Transition Scheme for Networks, Dynamic Load Balancing in Hybrid LiFi/WiFi. *Sensors* 2022, 22, 7583.

21. Pant U., Gupta P., Verma A., Pant P., Kumar A., Kumar Jadoun V. Analog/Digital Data Transmission using Li-Fi. *In Proceedings of the 2020 International Conference on Power Electronics IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, Mathura,

Uttar Pradesh, India, 28–29 February 2020. Pp. 54–58.

22. Wu X., O'Brien D.C. QoS-Driven Load Balancing in Hybrid LiFi and WiFi Networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2021, 21, 2136–2146.

23. Wijesinghe S.S., Priyantha Thilakumara R. PAPR Reduction and Multiuser Access using OFDMA for LiFi. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, Amaravati, India, 10–12 January 2020. Pp. 1–6.

24. Abdalla I., Rahaim M.B., Little T.D.C. Interference Mitigation Through User Association and Receiver Field of View Optimization in a Multi-User Indoor Hybrid RF/VLC Illuminance-Constrained Network. *IEEE Access* 2020, 8, 228779–228797.

25. Wu X., O'Brien D.C. A Novel Machine Learning-Based Handover Scheme for Hybrid LiFi and WiFi Networks. In *Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Taipei, Taiwan, 7–11 December 2020. Pp. 1–5.

26. Wu X., Haas H. Access point assignment in hybrid LiFi and WiFi networks in consideration of LiFi channel blockage. In *Proceedings of the IEEE Work. Signal Process Adv. Wirel. Commun (SPAWC)*, Sapporo, Japan, 3–6 July 2017.

27. Abdalla I., Rahaim M.B., Little T.D.C. On the Importance of Dynamic FOV Receivers for Dense Indoor Optical Wireless Networks. In *Proceedings of the ICC 2020—2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, 7–11 June 2020. Pp. 1–6.

28. Pal R.K., Dash S.P., Joshi S. Ghose D. Channel Estimation and Performance Analysis of a Wide-FOV Visible Light Communication System with Random Receiver Orientation and Location. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2022.

29. Wu X., Chen C., Haas H. Mobility Management for Hybrid LiFi and WiFi Networks in the Presence of Light-Path Blockage. In *Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago, IL, USA, 27–30 August 2018. Pp. 1–5.

30. Vijayaraghavan H., Prado A., Wiese T., Kellerer W. Algorithmic and System Approaches for a Stable LiFi-RF HetNet Under Transient Channel Conditions. In *Proceedings of the 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor*

and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Finland, 13–16 September 2021. Pp. 1048–1054.

31. Wu X., Brien D.O. A Novel Handover Scheme for Hybrid LiFi and WiFi Networks. *In Proceedings of the ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, 7–11 June 2020; pp. 5–9.

32. Wu X., Haas H. Load Balancing for Hybrid LiFi and WiFi Networks: To Tackle User Mobility and Light-Path Blockage. *IEEE Trans. Commun.* 2020, 68, 1675–1683.

33. Burchardt H., Serafimovski N., Tsonev D., Videv S., Haas H. VLC: Beyond point-to-point communication. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52. Pp. 98–105.

34. Ahmad R., Soltani M.D., Safari M., Srivastava A., Das A. Reinforcement Learning Based Load Balancing for Hybrid LiFi Wi-Fi Networks. *IEEE Access* 2020, 8, 132273–132284.

35. Prasetya A., Annisa J., Isbiyantoro S., Irsyada R. VIKOR multi-criteria decision making with AHP reliable weighting for article acceptance recommendation. *Int. J. Adv. Intell. Inform.* 2019, 5. Pp. 160–168.

36. Ishak A., Nainggolan B. Integration of Fuzzy AHP-VIKOR Methods in Multi Criteria Decision Making: Literature Review. *In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Ulaanbaatar, Mongolia, 10–13 September 2020. P. 12160.

37. Dabous S.A., Zeiada W., Zayed T., Al-Ruzouq R. Sustainability-informed multi-criteria decision support framework for ranking and prioritization of pavement sections. *J. Clean. Prod.* 2020, 244, 118755.

38. Song B., Kang S. A Method of Assigning Weights Using a Ranking and Nonhierarchy Comparison. *Adv. Decis. Sci.* 2016, 2016, 8963214.

39. Chowdhury M.Z., Hasan M.K., Shahjalal M., Hossan M.T., Jang Y.M. Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2020, 22. Pp. 930–966.

40. Yıldırım B.F., Yıldırım S.K. Evaluating the Satisfaction Level of Citizens in Municipality Services by Using Picture Fuzzy Vikor Method: 2014–2019 Period Analysis. *Decis. Mak. Appl. Manag. Eng.* 2022, 5. Pp. 50–66.

41. Radovanovi M., Ran A. Application of Hybrid Model Fuzzy Ahp-Vikor in Selection of the Most Efficient Procedure for Rectification of The Optical Sight of the Long-Range Rifle. *Decis. Mak. Appl. Manag. Eng.* 2020, 3. Pp. 131–148.
42. Bakioglu G., Atahan A.O. AHP integrated TOPSIS and VIKOR methods with Pythagorean fuzzy sets to prioritize risks in self-driving vehicles. *Appl. Soft Comput. J.* 2020, 99, 106948.
43. Albahri A.H.A.O.S., Alsattar A.A.Z.H.A., Albahri B.B.Z.A.S. Hospital selection framework for remote MCD patients based on fuzzy q-rung orthopair environment. *Neural Comput. Appl.* 2022, 5. Pp. 1–12.
44. Vojinovi'c N., Stevi'c Ž., Tanackov I. A Novel IMF SWARA-FDWGA-PESTEL Analysis for Assessment of Healthcare System. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl.* 2022, 5, Pp. 139–151.
45. Hosseini S.M., Paydar M.M., Hajiaghahi-Keshteli M. Recovery solutions for ecotourism centers during the Covid-19 pandemic: Utilizing Fuzzy DEMATEL and Fuzzy VIKOR methods. *Expert Syst. Appl.* 2021, 185, 115594.
46. Büyüközkan G., Görener A. Evaluation of product development partners using an integrated AHP-VIKOR model. *Kybernetes* 2015.
47. Li X., Song W. A rough VIKOR-based QFD for prioritizing design attributes of product-related service. *Math. Probl. Eng.* 2016, 9642018.
48. Singh S., Olugu E.U., Musa S.N., Mahat A.B., Wong K.Y. Strategy selection for sustainable manufacturing with integrated AHP-VIKOR method under interval-valued fuzzy environment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 84. Pp. 547–563.
49. Abdul D., Wenqi J., Tanveer A. Prioritization of renewable energy source for electricity generation through AHP-VIKOR integrated methodology. *Renew. Energy* 2022, 184. Pp. 1018–1032.
50. Wang B., Song J., Ren J., Li K., Duan H. Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP-VIKOR based prioritization from life cycle perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 2019, 142, Pp. 78–87.
51. Liang S., Zhang Y., Fan B. Tian, H. Multi-Attribute Vertical Handover Decision-Making Algorithm in a Hybrid VLC-Femto System. *IEEE Commun. Lett.* 2017, 21. Pp.

1521–1524.

52. Farrag M., Shamim M.Z., Usman M., Hussein H.S. Load Balancing Scheme in Hybrid WiGig/LiFi Network. *IEEE Access* 2020, 8. Pp. 222429–222438.

53. Ma W., Zhang L., Jiang Y. Optimized joint LiFi coordinated multipoint joint transmission clustering and load balancing for hybrid LiFi and WiFi networks. *J. Opt. Commun. Netw.* 2020, 12. Pp. 227–238.

54. Ma G., Parthiban R., Karmakar N. Novel handover algorithms using pattern recognition for hybrid LiFi networks. *In Proceedings of the 2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Rhodes, Greece, 30 June–3 July 2022. Pp. 1–7.

55. Hasan M.K., Shahjalal M., Chowdhury M.Z., Hossan M.T., Jang Y.M. Fuzzy Logic Based Network Selection in Hybrid OCC/Li-Fi Communication System. *In Proceedings of the 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Prague, Czech Republic, 3–6 July 2018. Pp. 95–99.

56. Sanusi J., Idris S., Adeshina S., Aibinu A.M., Umar I. Development of Handover Decision Algorithms in Hybrid Li-Fi and Wi-Fi Networks. *In Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Thoothukudi, India, 3–5 December 2020. Pp. 1232–1239.

57. Nor A.M. Access point selection in beyond 5G hybrid MmWave/Wi-Fi/Li-Fi network. *Phys. Commun.* 2021, 46, 101299. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490721000367>

58. Lin C., Kou G., Peng Y., Alsaadi F.E. Aggregation of the nearest consistency matrices with the acceptable consensus in AHP-GDM. *Ann. Oper. Res.* 2020, 316, Pp. 179–195.

59. Kou G., Yang P., Peng Y., Xiao F., Chen Y., Alsaadi F.E. Evaluation of feature selection methods for text classification with small datasets using multiple criteria decision-making methods. *Appl. Soft Comput.* 2020, 86, 105836.

60. Li G., Kou G., Peng Y. A group decision making model for integrating heterogeneous information. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Syst.* 2016, 48, Pp. 982–992.

61. Zhang H., Kou G., Peng Y. Soft consensus cost models for group decision making and economic interpretations. *Eur. J. Oper. Res.* 2019, 277, Pp. 964–980.

62. Ozyurt A.B., Basaran M., Durak-Ata L. Impact of Self-Configuration on Handover Performance in Green Cellular Networks. *Proc. 2018 Adv. Wirel. Opt. Commun. RTUWO*. 2018, Pp. 194–197.
63. Ozyurt A.B., Popoola W.O. Mobility management in multi-tier LiFi networks. *J. Opt. Commun. Netw.* 2021, 13, Pp. 204–213.
64. Cogalan T., Haas H. Why would 5G need optical wireless communications? *In Proceedings of the 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 8–13 October 2017. Pp. 1–6.
65. Abdallah W., Krichen D., Boudriga N. An optical backhaul solution for LiFi-based access networks. *Opt. Commun.* 2020, 454, 124473. Available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401819307709>
66. Murugaveni S., Mahalakshmi K. Optimal frequency reuse scheme based on cuckoo search algorithm in Li-Fi fifth-generation bidirectional communication. *IET Commun.* 2020, 14, Pp. 2554–2563.
67. Gutema T.Z., Haas H., Popoola W.O. Bias Point Optimisation in LiFi for Capacity Enhancement. *J. Light Technol.* 2021, 39, Pp. 5021–5027.
68. Cheong D., Yoon S.M., Yoon G., Seo D., Won Y. Wireless Light Fidelity Channel Capacity Improvement Using Sparse Sampled Non-Orthogonal Frequency Shift Keying. *IEEE Access* 2019, 7, Pp. 95170–95177.
69. Haas H. LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. *Rev. Phys.* 2018, 3, Pp. 26–31. Available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405428317300151>
70. Subha T.D., Subash T.D., Elezabeth Rani N., Janani P. Li-Fi: A Revolution in Wireless Networking. *Mater. Today Proc.* 2019, 24, Pp. 2403–2413
71. Chowdhury M.Z., Hossan M.T., Islam A., Jang Y.M. A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications. *IEEE Access* 2018, 6, Pp. 9819–9840.
72. Sarbazi E., Safari M., Haas H. The bit error performance and information transfer rate of SPAD array optical receivers. *IEEE Trans. Commun.* 2020, 68, Pp. 5689–5705.

73. Yuksel H., Altunay Ö. Host-to-host TCP/IP connection over serial ports using visible light communication. *Phys. Commun.* 2020, 43, 101222. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490720302998>
74. Wu X., Soltani M.D., Zhou L., Safari M., Haas H. Hybrid LiFi and WiFi Networks: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2021, 23, Pp. 1398–1420.
75. Wu X., Haas H. Joint Optimisation of Load Balancing and Handover for Hybrid LiFi and WiFi Networks Xiping. *J. Opt. Commun. Netw.* 2019, 11, Pp. 588–597.
76. Soltani M.D., Purwita A.A., Zeng Z., Chen C., Haas H. Safari M. An Orientation-based Random Waypoint Model for User Mobility in Wireless Networks. *In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Dublin, Ireland, 7–11 June 2020.
77. Goepel K.D. Comparison of judgment scales of the analytical hierarchy process—A new approach. *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.* 2019, 18, Pp. 445–463.
78. Srdjevic B., Srdjevic Z., Reynolds K.M., Lakicevic M., Zdero S. Using Analytic Hierarchy Process and Best–Worst Method in Group Evaluation of Urban Park Quality. *Forests* 2022, 13, 290. Available online: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/2/290>
79. Gómez-Cano C.A., Sánchez-Castillo V., Millán-Rojas E.E. Aproximación teórico-práctica al concepto de Valor Ganado en la gestión de proyectos. *Rev. Criterios.* 2020, 27, Pp. 189–216.
80. Alamoodi A.H., Albahri O.S., Zaidan A.A., AlSattar H.A., Ahmed M.A., Pamucar D., Zaidan B.B., Albahri A.S., Mahmoud M.S. New Extension of Fuzzy-Weighted Zero-Inconsistency and Fuzzy Decision by Opinion Score Method Based on Cubic Pythagorean Fuzzy Environment: A Benchmarking Case Study of Sign Language Recognition Systems. *Int. J. Fuzzy Syst.* 2022, № 22, Pp. 1–8.
81. Старушок В.С., Лутюк Л.І., Клейн О.М. Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi / *Збірник наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024»*. Хмельницький, 2024, С. 477-481. URL: <https://kn.khmn.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2024-corpuspaper.pdf>

Додаток А
Презентація роботи

Метод координації точок доступу в
мережах Wi-Fi

Валентин СТАРУШОК

Науковий керівник
к.т.н., доцент Дмитро МЕДЗАТИЙ

Хмельницький
2025

Актуальність роботи.

Розвиток Wi-Fi технологій пройшов кілька важливих етапів, забезпечуючи швидше з'єднання, більшу надійність і розширену функціональність, однак цей процес супроводжується низкою проблем, які потребують вирішення. Впровадження Wi-Fi 6E із використанням застосункового діапазону частот 6 ГГц стало значущим кроком, спрямованим на подолання перевантаження традиційних частот 2,4 ГГц і 5 ГГц, але залишається питанням забезпечення стабільності зв'язку та мінімізації затримок у середовищах із високою щільністю підключень. Подальший розвиток, представлений Wi-Fi 7 (802.11be), обіцяє швидкості понад 30 Гбіт/с та ефективніше управління трафіком для технологій AR/VR, потокового 8K-відео та індустріального інтернету речей (IIoT), але викликає занепокоєння стосовно сумісності старого обладнання та економічної доцільності впровадження. Значною проблемою залишається організація кластеризації точок доступу, ефективної комунікації між ними та управління трафіком у таких кластерах. Тому дослідження спрямовані на вирішення цих викликів, зокрема на покращення швидкодії точок доступу і оптимізацію взаємодії між ними як у межах одного кластера, так і між різними кластерами, що є критично важливим для досягнення високої продуктивності сучасних бездротових мереж.

Актуальність роботи полягає в розробці методу координації точок доступу у Wi-Fi мережах на основі їх кластеризації.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є покращення ефективності координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи забезпечення розподілу каналів та багатовимірної схеми координації з декількома точками доступу в комп'ютерних мережах;
- розробити метод координації точок доступу у Wi-Fi мережах;
- розробити модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації;
- розробити алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.

Об'єктом дослідження є процес координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

Предметом дослідження є методи та засоби координації точок доступу у Wi-Fi мережах.

3

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах, особливістю якого є групування точок доступу в кластери з врахуванням перекриття ними областей території, врахування завантаженості каналів, пропускної здатності каналів та черг до каналів, який дав змогу розробити систему, в якій оптимізовано роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

На основі проведених досліджень розроблено метод та алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні алгоритмів координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися теорія множин, методи кластеризації, теорія комп'ютерних мереж.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [81] у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». (Хмельницький – 2024. – С. 477-481).

4

Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi є важливим елементом забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж, особливо у середовищах із високою щільністю користувачів. Його мета — зменшити вплив взаємних перешкод між точками доступу (AP, Access Points) і покращити якість обслуговування. Основні методи координації можна поділити на кілька категорій:

- 1) розподіл частотних каналів;
- 2) керування потужністю передавачів;
- 3) розподіл навантаження;
- 4) використання спектру для одночасного обслуговування декількох пристроїв;
- 5) розумне керування трафіком;
- 6) синхронізація точок доступу;
- 7) використання адаптивних алгоритмів.

5

Основні етапи розроблення методу:

- 1) аналіз вимог і постановка завдання;
- 2) проєктування алгоритму координації;
- 3) формалізація алгоритму;
- 4) моделювання та симуляція;
- 5) прототипування;
- 6) оптимізація та удосконалення.

При здійсненні аналізу вимог і постановки завдання потрібне визначення цілей:

- 1) зменшення взаємних перешкод;
- 2) підвищення пропускнуої здатності;
- 3) покращення якості обслуговування.

6

Метод координатної точок доступу у Wi-Fi-мережах передбачає оптимізацію їхньої роботи для забезпечення максимальної продуктивності, мінімізації інтерференції та рівномірного розподілу навантаження.

Основні кроки цього методу з урахуванням параметрів:

- 1) аналіз топології мережі;
- 2) вибір каналів та мінімізація інтерференції;
- 3) оптимізація відстані між точками доступу;
- 4) регулювання потужності та перекриття зон покриття;
- 5) кластеризація точок доступу;
- 6) оцінка пропускної здатності каналів зв'язку;
- 7) оптимізація черг до точок доступу.

7

Розробимо алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi з урахуванням перекриття зон дії та каналів зв'язку з поданням його основними кроками.

Алгоритм кластеризації точок доступу Wi-Fi.

Вхідні дані:

- 1) координати точок доступу (x_i, y_i) ;
- 2) радіуси покриття точок доступу r_i ;
- 3) канали зв'язку точок доступу c_i (1–13 для 2.4 ГГц або 36+ для 5 ГГц).

Результатом роботи алгоритму будуть побудовані кластери точок доступу, що мінімізують інтерференцію.

Основні кроки алгоритму.

Крок 1. Визначення перекриття зон покриття:

- 1.1) для кожної пари точок доступу $A_{td,j}$ та $A_{td,i}$ обчислити відстань між ними:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2};$$

якщо $d_{i,j} < (r_i + r_j)$, то зони перекриваються.

- 1.2) побудувати граф перекриття, де вузлами є точки доступу, а ребра з'єднують точки, чий покриття перекриваються.

- **Крок 2. Групування точок доступу за перекриттям:**
- 2.1) використати алгоритм кластеризації на графах: спектральна кластеризація; DBSCAN (якщо є щільні групи); Louvain (якщо мережа велика);
- 2.2) кластери повинні мати мінімальний рівень взаємного перекриття.
- **Крок 3. Оптимізація за каналами зв'язку**
- 3.1) у кожному кластері призначити канали точкам доступу так, щоб мінімізувати використання однакових каналів у перекритих зонах, вибрати канали з мінімальним рівнем шуму (якщо є дані про спектральну завантаженість);
- 3.2) використати метод розфарбовування графа, де кожен вузол точок доступу це вершина графу, коже перекриття це ребро та розфарбувати граф так, щоб сусідні вузли мали різні кольори (канали).
- **Крок 4. Перевірка та оптимізація:**
- **4.1)** оцінити рівень інтерференції;
- 4.2) якщо є сильні завади, то повторити етап призначення каналів;
- 4.3) розглянути відключення зайвих точок доступу або зменшення потужності.
- Цей алгоритм зменшує інтерференцію між точками доступу та покращує якість Wi-Fi-мережі.

ВИСНОВКИ

- У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено новий метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах та отримано такі результати.
- 1. Проаналізовано відомі методи та засоби забезпечення координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.
- 2. Розроблено метод координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.
- 3. Розроблено модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.
- 4. Розроблено алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах на основі кластеризації.

Додаток Б
Наукова праця здобувача

Сертифікат № 2024-033-1



Міністерство освіти і науки України
Хмельницький національний університет

СЕРТИФІКАТ



Старушок Валентин Сергійович

учасник XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024»
24 години участі (0,8 ECTS credits)

Голова оргкомітету АПКН-2024

Олег СИНЮК

проректор Хмельницького національного
університету з наукової роботи,
доктор технічних наук, професор

м. Хмельницький
15-16 листопада 2024

E-mail: apkt.khnu@gmail.com

УДК 004.4

Старушок В.С., Лутюк Л.І., Клейн О.М.

*Хмельницький національний університет***МЕТОД КООРДИНАЦІЇ ТОЧОК ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ WI-FI**

Розглянуто прикладні аспекти розробки методу координації точок доступу в мережах Wi-Fi. Метою роботи є покращення швидкодії з точок доступу і комунікації між ними в кластерах і між кластерами. Встановлено, що для покращення швидкодії з точок доступу потребує розроблення механізм їх координації, який суттєво впливає на швидкодію.

Applied aspects of developing the method of coordination of access points in Wi-Fi networks are considered. The purpose of the work is to improve the speed from access points and communication between them in clusters and clusters. It is established that to improve the speed from access points requires the development of a mechanism for their coordination, which significantly affects the speed.

Розвиток Wi-Fi технологій пройшов кілька важливих етапів, забезпечуючи швидше з'єднання, більшу надійність і розширену функціональність.

Wi-Fi 6E розширив можливості Wi-Fi 6 за рахунок використання додаткового діапазону частот 6 ГГц, що дозволяє уникати перевантаження на традиційних частотах 2,4 ГГц та 5 ГГц. Це підвищує швидкість та зменшує затримки в мережах з високим навантаженням. Wi-Fi 7 (802.11be) – майбутнє. Wi-Fi 7 (проект 802.11be), який наразі активно розробляється, обіцяє ще більше підвищити швидкість і ефективність. Очікується, що Wi-Fi 7 дозволить досягти швидкостей понад 30 Гбіт/с і запропонує ще більш ефективне управління трафіком для новітніх технологій, таких як AR/VR, потокове 8K-відео та індустріальні інтернет-речей (IIoT).

Отже, Wi-Fi постійно розвивається, щоб відповідати зростаючим вимогам щодо швидкості, надійності та масштабу підключень у сучасному цифровому світі. З кожним новим стандартом покращуються не тільки технічні характеристики, але й зручність використання у складних та насичених мережах.

Важливим напрямом дослідження використання технології Wi-Fi є напрям кластеризації точок доступу і комунікації між ними в цих кластерах і між кластерами.

Тому, метою роботи є покращення швидкодії з точок доступу і комунікації між ними в кластерах і між кластерами.

Кластери вузлів точок доступу Wi-Fi – це мережеві структури, що об'єднують кілька точок доступу (AP – Access Points) для забезпечення більшої зони покриття та оптимізації розподілу трафіку в Wi-Fi мережах. Це особливо корисно

для великих або густонаселених просторів, де одна точка доступу не може забезпечити стабільне з'єднання для всіх пристроїв.

Основні характеристики кластерів вузлів Wi-Fi.

Розширене покриття. Кластери дозволяють покрити більшу територію, використовуючи кілька точок доступу, розташованих в різних частинах приміщення або території. Це мінімізує "мертві зони", забезпечуючи надійне з'єднання у всіх куточках.

Балансування навантаження. У великих мережах кожна точка доступу може одночасно обслуговувати обмежену кількість пристроїв. Кластери точок доступу забезпечують рівномірний розподіл пристроїв між різними AP, запобігаючи перевантаженню однієї точки. Це покращує якість з'єднання, особливо в умовах високої щільності користувачів.

Швидке роумінг-перемикання. У кластерній Wi-Fi мережі роумінг між точками доступу може відбуватися безшовно. Це означає, що коли користувач переміщується між зонами покриття різних точок доступу, його пристрій автоматично підключається до найближчої точки без розриву з'єднання.

Централізоване управління. Кластери вузлів Wi-Fi можуть управлятися централізовано через спеціальні контролери або програмне забезпечення. Це дозволяє адміністраторам мережі ефективно керувати точками доступу, налаштовувати політики безпеки, оптимізувати розподіл трафіку і стежити за станом всієї мережі.

Можливості масштабування. Однією з ключових переваг кластерів є простота масштабування мережі. При потребі можна додати нові точки доступу до кластеру, щоб забезпечити більше підключень або розширити зону покриття без значної перебудови мережі.

Розглянемо технології для побудови кластерів вузлів.

Mesh Wi-Fi: Це технологія, що дозволяє точкам доступу утворювати "мережу" (mesh), де кожен вузол може безпосередньо спілкуватися з іншими вузлами, забезпечуючи більш стабільне з'єднання. У таких системах кожен пристрій у кластері може передавати дані через інших учасників мережі, що підвищує надійність і знижує затримки.

Контролери Wi-Fi: Для великих корпоративних мереж часто використовуються контролери, які управляють усіма точками доступу в кластері. Контролери можуть бути апаратними або програмними рішеннями, які відповідають за налаштування, моніторинг та управління трафіком.

Використання кластерів точок доступу:

Корпоративні мережі: В офісах і бізнес-центрах кластери використовуються для забезпечення безперервного доступу до мережі з безшовним роумінгом.

Публічні простори. У торгових центрах, стадіонах, аеропортах та інших місцях із великою кількістю людей кластери точок доступу забезпечують надійне з'єднання для сотень чи тисяч користувачів.

Розумні міста. В інфраструктурах розумних міст кластери вузлів використовуються для забезпечення інтернету для камер спостереження, сенсорів і громадських Wi-Fi мереж.

Кластери вузлів точок доступу є основою для побудови сучасних бездротових мереж, що забезпечують гнучкість, надійність та високу продуктивність з'єднань навіть у складних умовах.

У кластерах Wi-Fi використовуються протоколи маршрутизації для ефективного керування трафіком між точками доступу та забезпечення безперервного з'єднання. Ось основні протоколи, що застосовуються в таких системах:

1. HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)

HWMP – це гібридний протокол маршрутизації, розроблений для Wi-Fi Mesh мереж. Він є стандартом для 802.11s – розширення Wi-Fi для побудови Mesh мереж, де точки доступу утворюють динамічну мережу з багатьма маршрутами. HWMP поєднує елементи протоколів реактивної маршрутизації (наприклад, AODV) і проактивної маршрутизації.

Реактивна маршрутизація. Використовується для знаходження маршрутів тільки тоді, коли з'являється необхідність передати дані.

Проактивна маршрутизація. Регулярно оновлює таблиці маршрутів для забезпечення швидкого доступу до маршрутів.

2. OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

OLSR – це проактивний протокол маршрутизації, що використовується в багатьох бездротових мережах, зокрема Mesh-мережах. Він працює на основі алгоритмів стану каналу, що дозволяє вузлам обмінюватися інформацією про мережеву топологію. OLSR. Постійно підтримує актуальну таблицю маршрутів у кожному вузлі. Використовує "багатоточкові ретранслятори" (MPR), що дозволяють мінімізувати обсяг даних, які передаються при обміні інформацією про маршрути.

3. AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing)

AODV – це реактивний протокол маршрутизації, що використовується в ад-хок мережах і Mesh Wi-Fi мережах. Він будує маршрути лише за необхідністю, коли потрібно передати дані, що дозволяє уникати зайвого навантаження на мережу. AODV має кілька важливих характеристик:

Не підтримує постійні таблиці маршрутів, а створює їх "на вимогу".

Використовує механізм широкомовного запиту, щоб знаходити маршрути до вузлів.

4. B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking)

B.A.T.M.A.N. – це протокол маршрутизації, розроблений для мобільних ад-хок мереж, який також використовується в Wi-Fi Mesh мережах. Він працює на основі децентралізованого підходу:

Кожен вузол визначає лише найкращий наступний вузол, через який можна передати дані.

Таблиці маршрутизації ускладнені мінімально, що робить B.A.T.M.A.N. легким і швидким для використання в динамічних мережах.

5. DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing)

DSDV – це проактивний протокол для ад-хок мереж, який підтримує постійно оновлені таблиці маршрутизації. Він використовує маршрути на основі метрик відстані, але з додаванням сортування послідовності для забезпечення актуальності маршрутів і уникнення петель.

6. IEEE 802.11s і Mesh-маршрутизація

Стандарт 802.11s визначає специфікацію для створення Mesh мереж Wi-Fi, де кілька точок доступу можуть динамічно об'єднуватися в кластер для розширення зони покриття. Маршрутизація у таких мережах базується на HWMP або інших протоколах, що підтримують динамічні топології і мають можливість автоматично відновлювати з'єднання у разі змін у мережі.

Схема на рисунку 1 ілюструє, як кілька точок доступу формують Mesh-мережу, де кожен вузол підключений до інших і забезпечує передачу даних між пристроями. Протоколи маршрутизації, такі як HWMP або OLSR, допомагають керувати трафіком, оптимізуючи шляхи з'єднання.



Рисунок 1 – Графічна схему маршрутизації в кластерах точок доступу Wi-Fi

Отже, протоколи маршрутизації, такі як HWMP, OLSR, AODV, В.А.Т.М.А.Н. та DSDV, дозволяють ефективно організувати передачу даних між точками доступу в кластерах Wi-Fi, оптимізуючи маршрути та підвищуючи стабільність роботи мережі. Кожен із цих протоколів має свої сильні сторони, і вибір залежить від конкретних вимог до мережі, таких як динамічність, навантаження і необхідність підтримки реального часу.

Перелік посилань

1. Deng, L., Li, D., Cai, Z. et al. Smart IoT information transmission and security optimization model based on chaotic neural computing. *Neural Comput & Applic* 32, 16491–16504 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04162-4>
2. Zhang, H., Shi, Z., Chadli, M. et al. Guest editorial: Networked cyber-physical systems: Optimization theory and applications. *Peer-to-Peer Netw. Appl.* 12, 1624–1626 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12083-019-00811-6>.

Додаток В

Результати перевірки на плагіат

Anti-Plagiarism v-15.260 Educational

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 229482 Назва: МКР Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi Додано в БД: 2025-04-15 Автора: Валентин СТАРУШОК Керівник: Дмитро МЕДЗАПІЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	146981	1103	891 (1%)	10 (1%)

ID	Джерело плагіату	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
	Опис		



Дата звіту 4/15/2025

Дата редагування 4/15/2025

Документ прийнятий

Звіт подібності

метадані

Назва організації

Khmelnytskyi National University

Заголовок

СТАРУШОК_Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Автор

Валентин СТАРУШОК Науковий керівник / Експерт

підрозділ

Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

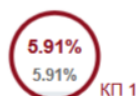
Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		2
Інтервали		0
Мікропробіли		164
Білі знаки		1
Парафрази (SmartMarks)		58

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

21115

Кількість слів

158829

Кількість символів

Додаток Г

Програмний код для комунікації між пристроями IoT

з використанням захищеного протоколу

1. Функція автоматичного налаштування (Self-Configuration)

```
def configure_access_point(ap, environment_data):
    """
    Автоматичне налаштування параметрів точки доступу.

    Args:
        ap (dict): Дані точки доступу (параметри: ID, поточний канал, потужність).
        environment_data (list): Список сусідніх точок доступу та їх параметри.

    Returns:
        dict: Оновлені параметри точки доступу.
    """
    # Вибір найменш завантаженого каналу
    used_channels = [neighbor['channel'] for neighbor in environment_data]
    available_channels = [ch for ch in range(1, 12) if ch not in used_channels]
    ap['channel'] = available_channels[0] if available_channels else ap['channel']

    # Початкове налаштування потужності
    ap['power'] = 20 # У міліватах (mW), стандартна потужність

    print(f"AP {ap['id']} налаштовано: канал {ap['channel']}, потужність {ap['power']} mW.")
    return ap
```

2. Функція автоматичної оптимізації (Self-Optimization)

```
def optimize_network(aps, clients):
    """
    Оптимізація параметрів точок доступу для покращення продуктивності мережі.

    Args:
        aps (list): Список точок доступу (параметри: ID, канал, потужність, клієнти).
        clients (list): Список підключених клієнтів (параметри: ID, сигнал, підключений AP).

    Returns:
        list: Оновлені параметри точок доступу.
    """
    for ap in aps:
        # Балансування навантаження
        ap_clients = [client for client in clients if client['connected_ap'] == ap['id']]
        if len(ap_clients) > 20: # Якщо клієнтів більше порогу
            print(f"AP {ap['id']} перевантажено ({len(ap_clients)} клієнтів). Зменшення потужності.")
            ap['power'] = max(ap['power'] - 5, 5) # Зниження потужності
        elif len(ap_clients) < 5:
            print(f"AP {ap['id']} недовантажено. Збільшення потужності.")
            ap['power'] = min(ap['power'] + 5, 30) # Збільшення потужності

        # Оптимізація каналів
        used_channels = [neighbor['channel'] for neighbor in aps if neighbor['id'] != ap['id']]
        if ap['channel'] in used_channels:
            available_channels = [ch for ch in range(1, 12) if ch not in used_channels]
            if available_channels:
                ap['channel'] = available_channels[0]
```

```
print(f"AP {ap['id']} перемикнуто на канал {ap['channel']}.")
```

```
return aps
```

3. Функція автоматичного відновлення (Self-Healing)

```
def heal_network(aps, down_ap_id):
    """
    Відновлення покриття мережі при виході з ладу точки доступу.

    Args:
        aps (list): Список точок доступу (параметри: ID, канал, потужність).
        down_ap_id (int): ID точки доступу, яка вийшла з ладу.

    Returns:
        list: Оновлені параметри точок доступу.
    """
    print(f"AP {down_ap_id} не працює. Перерозподіл покриття...")
    for ap in aps:
        if ap['id'] != down_ap_id:
            ap['power'] = min(ap['power'] + 5, 30) # Збільшення потужності для
            сусідніх точок доступу
            print(f"AP {ap['id']} збільшено потужність до {ap['power']} мВт.")
    return aps
```

4. Функція моніторингу стану мережі

```
def monitor_network(aps, clients):
    """
    Моніторинг стану мережі.

    Args:
        aps (list): Список точок доступу.
        clients (list): Список клієнтів.

    Returns:
        dict: Зведення про стан мережі.
    """
    network_status = {
        "total_aps": len(aps),
        "total_clients": len(clients),
        "average_clients_per_ap": len(clients) / len(aps) if aps else 0,
        "overloaded_aps": [ap['id'] for ap in aps if len([client for client in
clients if client['connected_ap'] == ap['id']]) > 20],
    }
    print(f"Моніторинг: {network_status}")
    return network_status
```

5. Головна функція для самоорганізації

```
def self_organize_network(aps, clients, down_ap_id=None):
    """
    Повна самоорганізація мережі Wi-Fi.

    Args:
        aps (list): Список точок доступу.
        clients (list): Список клієнтів.
        down_ap_id (int, optional): ID точки доступу, яка вийшла з ладу.

    Returns:
        list: Оновлені параметри точок доступу.
    """
    if down_ap_id:
        aps = heal_network(aps, down_ap_id)

    aps = optimize_network(aps, clients)
    monitor_network(aps, clients)
```

```
return aps
```

Приклад використання

```
# Дані точок доступу та клієнтів
access_points = [
    {"id": 1, "channel": 1, "power": 20, "clients": []},
    {"id": 2, "channel": 6, "power": 20, "clients": []},
    {"id": 3, "channel": 11, "power": 20, "clients": []},
]

clients = [
    {"id": 101, "signal": -50, "connected_ap": 1},
    {"id": 102, "signal": -55, "connected_ap": 1},
    {"id": 103, "signal": -60, "connected_ap": 2},
    {"id": 104, "signal": -70, "connected_ap": 3},
]

# Запуск самоорганізації
updated_aps = self_organize_network(access_points, clients, down_ap_id=2)
```

Алгоритм автоматичного вибору Wi-Fi каналу з евристичними

```
import random
```

```
def scan_wifi_networks():
```

```
    """
```

Виконує сканування Wi-Fi мереж і повертає список точок доступу з їхніми параметрами.

```
    """
```

```
    networks = [
```

```
        {"SSID": "Net1", "channel": 1, "RSSI": -50},
```

```
        {"SSID": "Net2", "channel": 6, "RSSI": -60},
```

```
        {"SSID": "Net3", "channel": 6, "RSSI": -70},
```

```
        {"SSID": "Net4", "channel": 11, "RSSI": -80}
```

```
    ]
```

```
    return networks
```

```
def evaluate_channels(networks, available_channels=[1, 6, 11]):
```

```
    """
```

Оцінює кожен канал за евристичними критеріями та повертає рейтинг.

```
    """
```

```
    channel_scores = {ch: 0 for ch in available_channels}
```

```
    for net in networks:
```

```
        channel = net["channel"]
```

```
        rssi = net["RSSI"]
```

```
        if channel in channel_scores:
```

```
            channel_scores[channel] += 1 # Кількість точок на каналі
```

```
            channel_scores[channel] += abs(rssi) // 10 # Вплив потужності сигналу
```

```
    return channel_scores
```

```
def select_best_channel(channel_scores):
```

```
    """
```

Вибирає канал з найнижчим рейтингом (менш завантажений).

```
    """
```

```
    best_channel = min(channel_scores, key=channel_scores.get)
```

```
    return best_channel
```

```
# Основний алгоритм
```

```
networks = scan_wifi_networks()
```

```
channel_scores = evaluate_channels(networks)
```

```
best_channel = select_best_channel(channel_scores)
```

```
print(f"Рекомендований канал: {best_channel}");
```

Реалізація алгоритму кластеризації точок доступу Wi-Fi на мові C++ з використанням бібліотеки OpenCV для DBSCAN та NetworkX (через Boost Graph) для розфарбовування графа

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <map>
#include <set>
#include <boost/graph/adjacency_list.hpp>
#include <boost/graph/sequential_vertex_coloring.hpp>
#include <opencv2/core.hpp>
#include <opencv2/ml.hpp>

using namespace std;
using namespace boost;
using namespace cv;
using namespace ml;

struct AccessPoint {
    int id;
    double x, y, radius;
    int channel;
};

// Обчислення відстані між двома точками
double distance(const AccessPoint& a, const AccessPoint& b) {
    return sqrt(pow(a.x - b.x, 2) + pow(a.y - b.y, 2));
}

// DBSCAN для знаходження кластерів точок доступу
vector<int> clusterAccessPoints(vector<AccessPoint>& aps, double eps, int minPts) {
    Mat data(aps.size(), 2, CV_32F);
    for (size_t i = 0; i < aps.size(); ++i) {
        data.at<float>(i, 0) = aps[i].x;
        data.at<float>(i, 1) = aps[i].y;
    }

    Ptr<DBSCAN> dbscan = DBSCAN::create();
    dbscan->setEpsilon(eps);
    dbscan->setMinSamples(minPts);
    Mat labels;
    dbscan->train(data, labels);

    vector<int> clusters(aps.size());
    for (size_t i = 0; i < aps.size(); ++i) {
        clusters[i] = labels.at<int>(i, 0);
    }
    return clusters;
}

// Призначення каналів точкам доступу з використанням розфарбовування графа
void assignChannels(vector<AccessPoint>& aps) {
    using Graph = adjacency_list<vecS, vecS, undirectedS>;
    Graph g(aps.size());

    // Додаємо ребра між точками, що перекриваються
    for (size_t i = 0; i < aps.size(); ++i) {
        for (size_t j = i + 1; j < aps.size(); ++j) {
            if (distance(aps[i], aps[j]) < (aps[i].radius + aps[j].radius)) {
                add_edge(i, j, g);
            }
        }
    }
}
```

```

    }
}

// Виконуємо розфарбовування графа
vector<int> colors(num_vertices(g));
sequential_vertex_coloring(g, make_iterator_property_map(colors.begin(), get(vertex_index, g)));

// Призначаємо канали (наприклад, 1, 6, 11 для 2.4 ГГц)
vector<int> availableChannels = {1, 6, 11};
for (size_t i = 0; i < aps.size(); ++i) {
    aps[i].channel = availableChannels[colors[i] % availableChannels.size()];
}
}

int main() {
    vector<AccessPoint> aps = {
        {0, 0, 0, 10, 0},
        {1, 5, 5, 10, 0},
        {2, 15, 5, 10, 0},
        {3, 25, 5, 10, 0},
        {4, 10, 10, 10, 0}
    };

    vector<int> clusters = clusterAccessPoints(aps, 10.0, 2);
    assignChannels(aps);

    for (const auto& ap : aps) {
        cout << "AP " << ap.id << " -> Cluster: " << clusters[ap.id] << ", Channel: " << ap.channel << endl;
    }
    return 0;
}

```

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Автор: Валентин СТАРУШОК

Спеціальність: 123 – Компютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Дмитро МЕДЗАТИЙ, к.т.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:


- окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10-40 джерелами на один фрагмент речення;
- всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

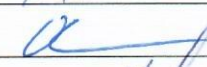
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає менше 6% і адресується до джерел з інтернету та бібліотеки, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру завдання і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.


Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС







Дмитро МЕДЗАТИЙ

Олег САВЕНКО

Ольга ПАВЛОВА

Завідувачу кафедри КІС,
доктору філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Валентин СТАРУШОК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-23-3

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

25 квітня 2025 року



РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Валентин СТАРУШОК

Тема: Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень -; кількість сторінок записки 108

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розроблено метод та засоби координації точок доступу в мережах Wi-Fi

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____

Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню _____

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо схем координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У другому розділі здійснено дослідження предметної області та розроблено модель координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У третьому розділі розроблено алгоритми координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У четвертому розділі здійснено розроблення методу координації точок доступу у Wi-Fi-мережах.

У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

4. Позитивні сторони роботи: _____

5. Негативні сторони роботи: немає.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: =

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4,00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Корецька Людмила Олександрівна, к.т.н., доцент кафедри АКІТР ХНУ

“ 29 ” квітня 2025р.



Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Валентин СТАРУШОК

Співавтор:

Назва: СТАРУШОК_Метод координації точок доступу в мережах Wi-Fi

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 5.9%

Коефіцієнт подібності 2: 1.7%

Мікропробіли: 164

Заміна букв: 2

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-04-15 13:15:38.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-04-15

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт