

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ кібербезпеки _____
(повна назва)

Кафедра _____ інформаційно-мережної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Дослідження особливостей організації потоків трафіку у бездротових
мережах 6 покоління

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи ІМІМ-24-2

Тимофій НІКОЛОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 172 Електронні комунікації
та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна
інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Микола МОСКАЛЕЦЬ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Микола МОСКАЛЕЦЬ _____
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування

Студент _____ / Ніколов Т.П./

Керівник _____ / Москалець М.В./

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ кібербезпеки _____
Кафедра _____ інформаційно-мережної інженерії _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(код і повна назва)
Освітня програма _____ інформаційно-мережна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ *Ніколову Тимофію Павловичу* _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ *Дослідження особливостей організації потоків трафіку у бездротових мережах 6 покоління* _____

затверджена наказом університету від 23 березня 2026р. №232 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Провести аналіз стандарту бездротових мереж 802.11ac. Дослідити методи та моделі керування трафіком, відзначити їх особливості та роль штучного інтелекту у роботі сучасних моделей керування навантаженням. Запропонувати рішення що дозволить ефективно аналізувати трафік у бездротових мережах на прикладі навчальної установи. Дослідити можливості динамічного об'єднання каналів на основі агрегації для бездротових мереж 802.11ac, відзначити його продуктивність.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ

1. Специфікація та архітектура стандарту бездротових мереж IEEE 802.11ac

2. Аналіз моделей управління трафіком в бездротових мережах

3. Дослідження можливості динамічного об'єднання каналів на основі агрегації для максимізації продуктивності мереж 802.11ac

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Слайди у форматі Power Point (назва та мета та актуальність роботи, характеристики сучасних бездротових мереж, використання діаграми Ківіата для планування бездротових мереж, алгоритм керування чергами на основі параметричної ідентифікації, метод експертних оцінок, особливості технології об'єднання каналів, моделювання роботи Wi-Fi у будинку, отримані результати та оцінка продуктивності, висновки)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	23.03.2026	вик.
2	Підбір літератури за темою роботи	24.03 - 10.04.2026	вик.
3	Специфікація та архітектура стандарту бездротових мереж IEEE 802.11ac	11.04 - 20.04.2026	вик.
4	Аналіз моделей управління трафіком в бездротових мережах	21.04 - 25.04.2026	вик.
5	Дослідження можливості динамічного об'єднання каналів на основі агрегації для максимізації продуктивності мереж 802.11ac	26.04 - 18.05.2026	вик.
6	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	19.05 - 20.05.2026	вик.

Дата видачі завдання 23 березня 2026 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Микола МОСКАЛЕЦЬ
(посада, власне ім'я, прізвище)

)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 с., 16 рис., 4 табл., 2 додатки, 31 джерело.

Об'єкт дослідження – бездротові мережі 6 покоління.

Мета роботи – дослідження методів управління трафіком у бездротових мережах.

Проблема раціональної організації функціонування систем, призначених для обслуговування стохастичних потоків запитів, є значущою для багатьох галузей техніки, економіки та сфери послуг. Ключовим завданням у цьому контексті є визначення чітких критеріїв ефективності та пошук оптимальних режимів роботи з урахуванням специфіки систем.

У даній роботі проаналізовано аспекти експлуатації бездротових мереж шостого покоління. Розроблено комплекс математичних моделей, які описують різні сценарії організації користувацьких потоків даних. Досліджено можливість об'єднання каналів для покращення адміністрування трафіку і боротьби з перенавантаженнями точок доступу у мережі.

ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ, БЕЗДРОВОВА МЕРЕЖА,
ОРГАНІЗАЦІЯ ПОТОКІВ ДАНИХ, ПРОГНОЗУВАННЯ, ОБ'ЄДНАННЯ
КАНАЛІВ, АГРЕГАЦІЯ.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 70 p., 16 fig, 4 table, 2 app, 31 sources.

The object of 6th-generation wireless networks.

The purpose of the work a study of traffic management methods in wireless networks.

The problem of efficiently organising the operation of systems designed to handle stochastic request flows is of significant importance to many sectors of engineering, the economy and the service industry. The key task in this context is to define clear performance criteria and identify optimal operating modes, taking into account the specific characteristics of the systems.

This paper analyses aspects of the operation of sixth-generation wireless networks. A set of mathematical models has been developed to describe various scenarios for organising user data flows. The possibility of channel aggregation to improve traffic management and combat access point congestion in the network has been investigated.

DYNAMIC TRAFFIC MANAGEMENT, WIRELESS NETWORK, DATA PATH ORGANISATION, FORECASTING, CHANNEL BUNDLING, AGGREGATION.

ЗМІСТ

	C.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
1 СПЕЦИФІКАЦІЯ ТА АРХІТЕКТУРА СТАНДАРТУ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC	11
1.1 Передумови виникнення стандарту та стратегічні рішення	11
1.2 Технічні характеристики стандарту 802.11ac	10
1.3 Методи збільшення швидкості передачі даних	12
1.4 Спектральний аналіз: розподіл каналів та підканалів	14
1.4.1 Концепція об'єднання каналів (Channel Bonding)	14
1.4.2 Специфіка використання DFS (Dynamic Frequency Selection)	15
1.4.3 Структура підканалів OFDM	15
1.5 Принципи побудови мереж 802.11ac	16
2 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ	17
2.1 Дослідження моделі управління трафіком у бездротових мережах	20
2.2 Застосування бездротових мереж в навчальних установах	27
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄДНАННЯ КАНАЛІВ НА ОСНОВІ АГРЕГАЦІЇ ДЛЯ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖ 802.11AC	38
3.1 Особливості технології об'єднання каналів (channel bonding)	39
3.2 Запропонований метод об'єднання каналів	42
3.3 Моделювання роботи Wi-Fi у будинку	44
3.4 Отримані результати та оцінка продуктивності	47
ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	57
ДОДАТОК А ПУБЛІКАЦІЇ	60
ДОДАТОК Б СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

A-MPDU/MSDU – Aggregated MAC Service Data Unit – технологія агрегації кадрів;

AP – Access Point – точка доступу;

CA – Carrier Aggregation – агрегація несучих;

CB – Channel Bonding – агрегація каналів;

DBCA – Dynamic Bandwidth Control Algorithm – алгоритм динамічного керування шириною каналу;

DFS – Dynamic Frequency Selection – функція Wi-Fi роутерів (у діапазоні 5 ГГц), яка автоматично змінює канал зв'язку, щоб уникнути перешкод;

FIFO – First In, First Out – принцип організації черги, де завдання, що надійшло першим, отримує обробку також найпершим;

GNN – Graph Neural Network – графова нейронна мережа;

MIMO – Multiple Input Multiple Output – технологія бездротового зв'язку, яка використовує дві або більше антен на передавачі та приймачі для одночасної багатопотокової передачі даних;

ML – Machine Learning – машинне навчання;

MSE – mean squared error – середньоквадратична похибка;

MU-MIMO – Multi-User MIMO – технологія бездротового зв'язку (Wi-Fi та стільниковий зв'язок), яка дозволяє маршрутизатору або точці доступу одночасно передавати дані на кілька пристроїв;

NDP – Null Data Packet – кадр без корисного навантаження (payload), що складається лише зі службового заголовка;

OFDM – ортогональне частотне мультиплексування;

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція;

QoS – Quality of Service – якість обслуговування;

SNR – Signal-to-Noise Ratio – співвідношення сигнал/шум;

SR-WLAN – Split-Reservation Wireless Local Area Network – бездротові локальні мережі з обмеженим радіусом дії;

STA – Station Access Point – кластер бездротових станцій;

SU-MIMO – Single-User MIMO – базова технологія бездротового зв'язку, яка використовує кілька антен для передачі даних;

WLAN – Wireless Local Area Network – бездротова локальна мережа;

БС – базова станція;

ЕМВ – електромагнітне випромінювання;

НВЧ – надвисокі частоти.

ВСТУП

На сьогодні бездротові мережі радіозв'язку набули значного поширення у сфері передачі даних, що зумовлено їхньою експлуатаційною зручністю, ефективністю та оптимальними показниками пропускної здатності.

Впровадження сучасних мобільних технологій, зокрема 5G та Wi-Fi 6, відкриває нові перспективи для високошвидкісного та надійного бездротового зв'язку. Разом із тим, цей розвиток супроводжується викликами, серед яких — перевантаження частотного спектра, вразливість до перешкод та обмеження зони покриття. Попри зазначені технічні складнощі, бездротові технології зберігають значний потенціал для подальшої інтеграції в сучасні інформаційні мережі.

На початку 2010-х років розвиток бездротових технологій зіткнувся з критичними викликами: експоненційне зростання обсягів споживання медіаконтенту високої чіткості (Ultra HD, 4K), поширення хмарних обчислень та стрімке збільшення кількості мобільних пристроїв зумовили нагальну потребу в підвищенні пропускної здатності та ємності мереж. Стандарт IEEE 802.11n (Wi-Fi 4), ратифікований у 2009 році, вичерпав свій потенціал через роботу в перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц та обмеження фізичної швидкості передачі даних.

Відповіддю на ці виклики стало впровадження стандарту IEEE 802.11ac. Затверджений наприкінці 2013 року, цей стандарт ознаменував перехід бездротових локальних мереж (WLAN) до «гігабітної ери».

Актуальність теми. Проблема раціональної організації функціонування систем, призначених для обслуговування стохастичних потоків запитів, є значущою для багатьох галузей техніки, економіки та сфери послуг. Ключовим завданням у цьому контексті є визначення чітких критеріїв ефективності та пошук оптимальних режимів роботи з урахуванням специфіки систем.

У даній роботі проаналізовано аспекти експлуатації бездротових мереж шостого покоління. Розроблено комплекс математичних моделей, які описують різні сценарії організації користувацьких потоків даних. Досліджено можливість об'єднання каналів для покращення адміністрування трафіку і боротьби з перенавантаженнями точок доступу у мережі.

1 СПЕЦИФІКАЦІЯ ТА АРХІТЕКТУРА СТАНДАРТУ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC

1.1 Передумови виникнення стандарту та стратегічні рішення

Хоча стандарт 802.11n впровадив технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), його ефективність у діапазоні 2,4 ГГц була суттєво обмежена високим рівнем інтерференції від побутових приладів та суміжних мереж. Обмежений частотний ресурс дозволяв використовувати лише три канали шириною 20 МГц, що виключало можливість подальшого масштабування продуктивності.

Розробники 802.11ac ухвалили стратегічне рішення щодо переходу виключно на діапазон 5 ГГц, що забезпечило наступні переваги:

- доступ до ширшого спектра частот (понад 350 МГц вільного простору відповідно до регіональних регламентів);
- мінімізація рівня зовнішніх завад;
- використання надшироких смуг пропускання (80 МГц та 160 МГц).

Впровадження стандарту відбувалося у два етапи:

1. 802.11ac Wave 1 (2013 рік): базовий етап, що забезпечив підтримку каналів до 80 МГц, модуляцію 256-QAM та використання до 3 просторових потоків (Spatial Streams) за технологією SU-MIMO. Теоретична гранична швидкість становила 1,3 Гбіт/с.

2. 802.11ac Wave 2 (2015 рік): ключове оновлення, що впровадило технологію MU-MIMO (Multi-User MIMO), яка дозволяє точці доступу одночасну взаємодію з кількома клієнтами. Також було додано канали 160 МГц та підтримку до 4 просторових потоків, що підвищило теоретичну швидкість до 6,93 Гбіт/с (при 8 потоках).

1.2 Технічні характеристики стандарту 802.11ac

Порівняно з попередніми генераціями, 802.11ac демонструє значний технологічний прогрес. Нижче наведено порівняльну таблицю ключових технічних параметрів (табл. 1.1)

Таблиця 1.1 – Характеристики сучасних бездротових мереж

Характеристика	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac Wave 1	IEEE 802.11ac Wave 2
Робоча частота	2.4 ГГц та 5 ГГц	Лише 5 ГГц	Лише 5 ГГц
Макс. ширина каналу	20, 40 МГц	20, 40, 80 МГц	20, 40, 80, 160 МГц (або 80+80 МГц)
Метод модуляції	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	До 256-QAM	До 256-QAM
Макс. кількість потоків	4	3	4 (на практиці), до 8 за стандартом
Технологія MIMO	SU-MIMO	SU-MIMO	MU-MIMO (Downlink)
Макс. теоретична швидкість	600 Мбіт/с	1.3 Гбіт/с	1.73 Гбіт/с (для 160 МГц), до 6.93 Гбіт/с (теоретичний ліміт)

1.3 Методи збільшення швидкості передачі даних

Досягнення гігабітних швидкостей у стандарті 802.11ac стало можливим завдяки синергії прогресивних методів фізичної та математичної обробки сигналів.

Модуляція високого порядку (256-QAM)

У попередньому стандарті 802.11n граничним методом кодування був 64-QAM (квадратурна амплітудна модуляція), де один символ відповідав за передачу 6 біт інформації ($2 \times 6 = 64$).

Стандарт 802.11ac впровадив підтримку 256-QAM ($2 \times 8 = 256$), що дозволяє кодувати 8 біт у кожному символі. Це забезпечує пряме зростання пропускної здатності на 33% за умови ідентичної ширини каналу.

Застосування 256-QAM зумовлює суттєві фізичні обмеження: через високу щільність розміщення точок сузір'я на фазовій площині сигнал стає вкрай чутливим до завад. Ефективне декодування даних за допомогою 256-QAM вимагає високого показника відношення сигнал/шум ($\text{SNR} \geq 30$ дБ), що можливо лише за умов прямої видимості або незначної віддаленості від точки доступу. У разі послаблення сигналу мережеве обладнання автоматично

адаптує рівень модуляції до 64-QAM, 16-QAM або QPSK для підтримки стабільності з'єднання.

Багатокористувацький MIMO (MU-MIMO)

У традиційних мережах Wi-Fi (включаючи 802.11ac Wave 1) реалізовано технологію SU-MIMO (Single-User). За цієї архітектури точка доступу, попри наявність кількості антен, здатна здійснювати передачу даних лише з одним клієнтом в межах одного часового інтервалу. За наявності значної кількості підключених пристроїв виникає черговість обслуговування, що призводить до деградації швидкості передачі та збільшення показників затримки (ping).

Технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO), впроваджена у стандарті Wave 2, кардинально оптимізує цей алгоритм (рис. 1.1).

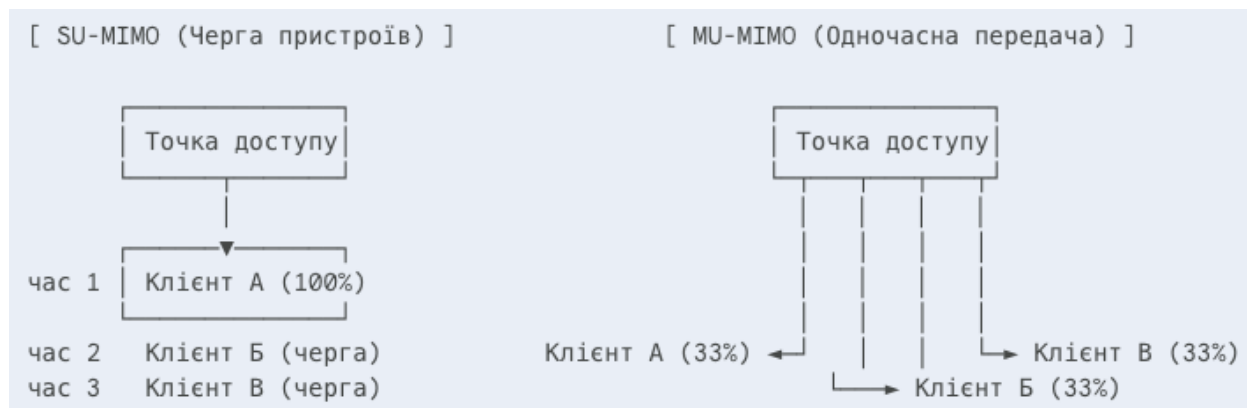


Рисунок 1.1 – Принцип роботи технологій SU-MIMO та MU-MIMO

Завдяки використанню просторового мультиплексування точка доступу 802.11ac Wave 2 з конфігурацією антен 4x4 здатна здійснювати одночасну передачу даних на три клієнтські пристрої (наприклад, з конфігурацією 1x1), залучаючи окремі просторові потоки для кожного з них. Це забезпечує значне зростання загальної пропускної здатності мережі та ефективне усунення ефекту «вузького місця».

Технологія формування променя (Transmit Beamforming)

У попередніх стандартах радіосигнал поширювався рівномірно (ізотропно), що призводило до утворення надлишкових відбитків та втрат енергії. Стандарт 802.11ac впровадив уніфіковану технологію формування спрямованого променя (Transmit Beamforming, TxBF).

Принцип функціонування:

1. Точка доступу виконує аналіз фазового зсуву сигналів, отриманих від клієнта, шляхом проведення процедури «зондування» (sounding) з використанням кадрів Null Data Packet (NDP).

2. На основі розрахованої матриці зворотного зв'язку (V) точка доступу здійснює динамічну корекцію фази та амплітуди сигналів для кожної антени.

3. Внаслідок накладання хвиль у місці розташування клієнта виникає конструктивна інтерференція (посилення сигналу), тоді як в інших зонах спостерігається деструктивна інтерференція.

Цей механізм дозволяє фокусувати радіосигнал безпосередньо на пристрої користувача, підвищуючи показник співвідношення сигнал/шум (SNR) та забезпечуючи стабільну модуляцію 256-QAM на збільшених дистанціях.

1.4 Спектральний аналіз: розподіл каналів та підканалів

Частотний діапазон 5 ГГц у стандарті 802.11ac структурований на декілька спектральних сегментів (зокрема UNII-1, UNII-2, UNII-3), кожен з яких регулюється відповідними нормативними вимогами.

1.4.1 Концепція об'єднання каналів (Channel Bonding)

Стандартна ширина каналу становить 20 МГц. Для підвищення швидкості передачі даних стандарт 802.11n дозволив об'єднання двох каналів у смугу 40 МГц. Стандарт 802.11ac розширив ці можливості, дозволивши агрегацію каналів до 80 МГц та 160 МГц (рис. 1.2).

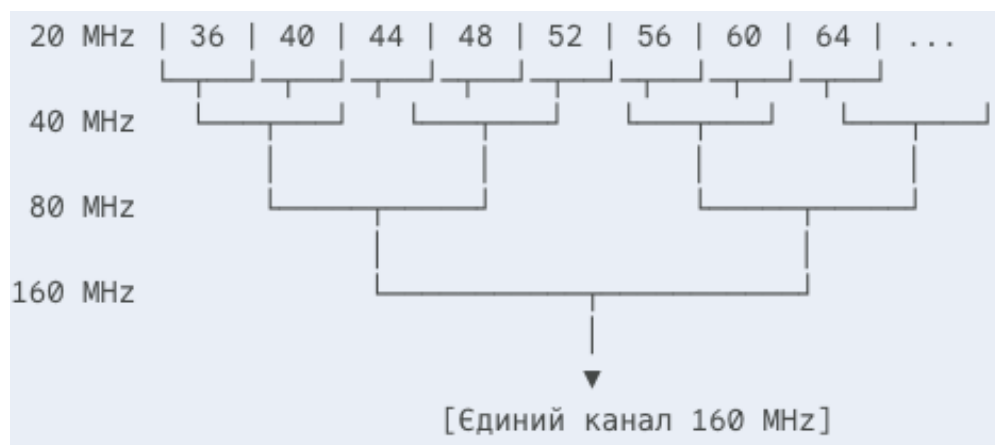


Рисунок 1.2 - Схематична структура об'єднання каналів у діапазоні 5 ГГц

Для реалізації надшироких каналів у Wave 2 передбачено два режими:

- безперервний (Contiguous): один суцільний канал шириною 160 МГц (наприклад, об'єднання каналів 36–64);
- фрагментований (80+80 МГц non-contiguous): передача здійснюється двома розділеними смугами по 80 МГц у різних частинах спектра. Це зручно, якщо всередині суцільного спектра 160 МГц виявлено завади або роботу радарів.

1.4.2 Специфіка використання DFS (Dynamic Frequency Selection)

Частина спектра 5 ГГц (канали з 52 по 144) збігається з частотами, які використовуються військовими та метеорологічними радарями. Тому стандарт 802.11ac зобов'язує обладнання підтримувати механізм DFS:

- перед початком роботи на DFS-каналі точка доступу повинна протягом 60 секунд слухати ефір на наявність сигналів радарів;
- якщо під час роботи виявлено радарний імпульс, точка доступу повинна миттєво звільнити канал і перевести всіх клієнтів на іншу частоту.

1.4.3 Структура підканалів OFDM

Як і попередні стандарти, 802.11ac використовує ортогональне частотне мультиплексування (OFDM). Кожен радіоканал ділиться на велику кількість ортогональних піднесучих частот (subcarriers).

При збільшенні ширини каналу кількість піднесучих зростає наступним чином:

- для каналу 20 МГц: всього 64 піднесучі (52 для даних, 4 пілотні для синхронізації, решта - захисні інтервали);
- для каналу 40 МГц: 128 піднесучих (108 для даних, 6 пілотних);
- для каналу 80 МГц: 256 піднесучих (234 для даних, 8 пілотних);
- для каналу 160 МГц: 512 піднесучих (468 для даних, 16 пілотних).

Відстань між піднесучими фіксована і становить 312.5 кГц. Така структура дозволяє системі гнучко адаптуватися до завад в ефірі: якщо одна або кілька піднесучих блокуються інтерференцією, передача на інших підканалах продовжується без втрати всього пакета даних.

1.5 Принципи побудови мереж 802.11ac

Проектування та розгортання бездротових локальних мереж корпоративного та домашнього рівня на базі 802.11ac базується на кількох критичних архітектурних принципах.

Принцип дводіапазонної топології (Dual-Band Design)

Оскільки стандарт 802.11ac функціонує виключно у діапазоні 5 ГГц, усі точки доступу класу 802.11ac розробляються як дводіапазонні (Dual-Band). Вони містять два окремих радіомодулі:

1. Радіомодуль 2.4 ГГц (працює за застарілим стандартом 802.11n/g) - для сумісності з дешевими IoT-пристроями, старими ноутбуками та забезпечення покриття на великих відстанях крізь стіни.

2. Радіомодуль 5 ГГц (працює за стандартом 802.11ac) - для високошвидкісних сучасних клієнтів (смартфони, телевізори, робочі станції).

Для оптимізації роботи використовується технологія Band Steering, яка автоматично перенаправляє пристрої, що підтримують 5 ГГц, зі завантаженого діапазону 2.4 ГГц на вільніший та швидший спектр 802.11ac.

Хвилі частотою 5 ГГц мають значно меншу довжину (≈ 6 см), ніж хвилі 2.4 ГГц (≈ 12 см). Через це вони зазнають значно більшого згасання під час проходження крізь перешкоди (рис. 1.3).

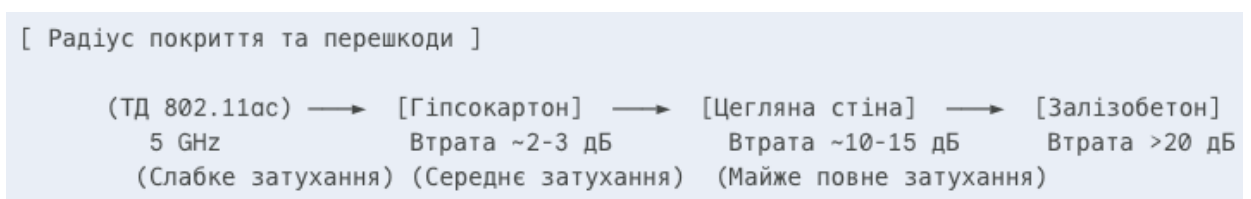


Рисунок 1.3 – Рівень згасання хвиль на частоті 5 ГГц з різними перешкодами

При побудові корпоративних бездротових мереж це вимагає:

1. Збільшення щільності встановлення точок доступу (радіус ефективної гігабітної зони однієї точки зазвичай не перевищує 10–15 метрів в умовах офісу).

2. Оптимального вибору ширини каналу. Незважаючи на привабливість каналів 80 МГц та 160 МГц, у середовищах із високою

щільністю пристроїв (High Density) адміністратори часто конфігурують мережу на канали 40 МГц. Це робиться для того, щоб мати більше непересічних каналів та уникнути взаємних завад (Co-Channel Interference).

Зворотна сумісність (Backward Compatibility)

Будь-який пристрій попередніх поколінь (802.11a/n) може підключитися до точки доступу 802.11ac у діапазоні 5 ГГц. Стандарт реалізує зворотну сумісність на фізичному рівні шляхом використання преамбул змішаного формату (Mixed Mode). Проте слід враховувати: присутність повільного клієнта (наприклад, 802.11a) у мережі знижує загальну ефективність ефіру (Airtime) для швидких пристроїв 802.11ac.

Стандарт IEEE 802.11ac став фундаментом для сучасного мобільного інтернету. Завдяки перенесенню трансляції в чистий діапазон 5 ГГц, впровадженню просторового розділення променів MU-MIMO, інтелектуальному фокусуванню сигналу Beamforming та щільній модуляції 256-QAM, розробникам вдалося подолати гігабітний бар'єр швидкості в бездротових мережах.

Незважаючи на появу новіших стандартів, 802.11ac залишається одним із наймасовіших, надійних та економічно ефективних рішень для побудови бездротових мереж у всьому світі.

2 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ

На сьогоднішній день телекомунікаційна галузь характеризується широким розмаїттям стандартів та видів бездротових мереж. Велика номенклатура обладнання, специфічні умови експлуатації та індивідуальні вимоги замовників зумовлюють високу складність проектування таких систем, що переводить ці завдання у розряд багатокритеріальних. Однак практична реалізація часто обмежується розрахунком зони Френеля, визначенням загальної потужності, кількістю точок доступу для забезпечення необхідної продуктивності та підбором обладнання згідно з бюджетом. Водночас критично важливі аспекти, такі як оптимальне розміщення точок доступу в приміщеннях, оцінка впливу архітектурних конструкцій на поширення сигналу та вибір топології мережі, нерідко вирішуються евристичними методами, поза межами формалізованих розрахункових схем.

Для якісного порівняння технічних характеристик та експлуатаційних можливостей бездротових мереж ефективно застосовуються діаграми Ківіата (різновид пелюсткових діаграм). Вони забезпечують візуалізацію та порівняльний аналіз декількох техніко-економічних показників мереж, що функціонують у різних середовищах. Кількість параметрів, що підлягають аналізу, зазвичай становить від 4 до 12.

На рисунках 2.1–2.3 наведено приклад діаграм Ківіата, що демонструють порівняння шести ключових показників для трьох типів бездротових мереж (за даними інтернет-джерел).

Представлені графічні матеріали ілюструють суттєві відмінності в техніко-економічних характеристиках бездротових мереж, що залежать від функціонального призначення та умов експлуатації, а також відображають значну варіативність витрат на їх впровадження.

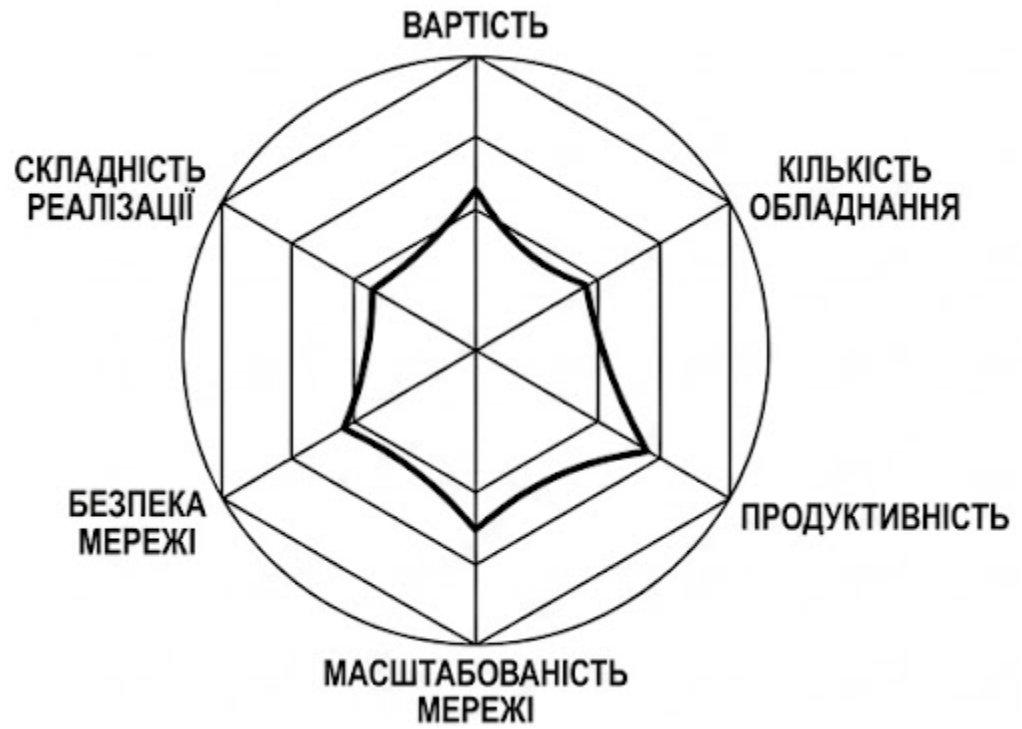


Рисунок 2.1 - Мережа відеоспостереження

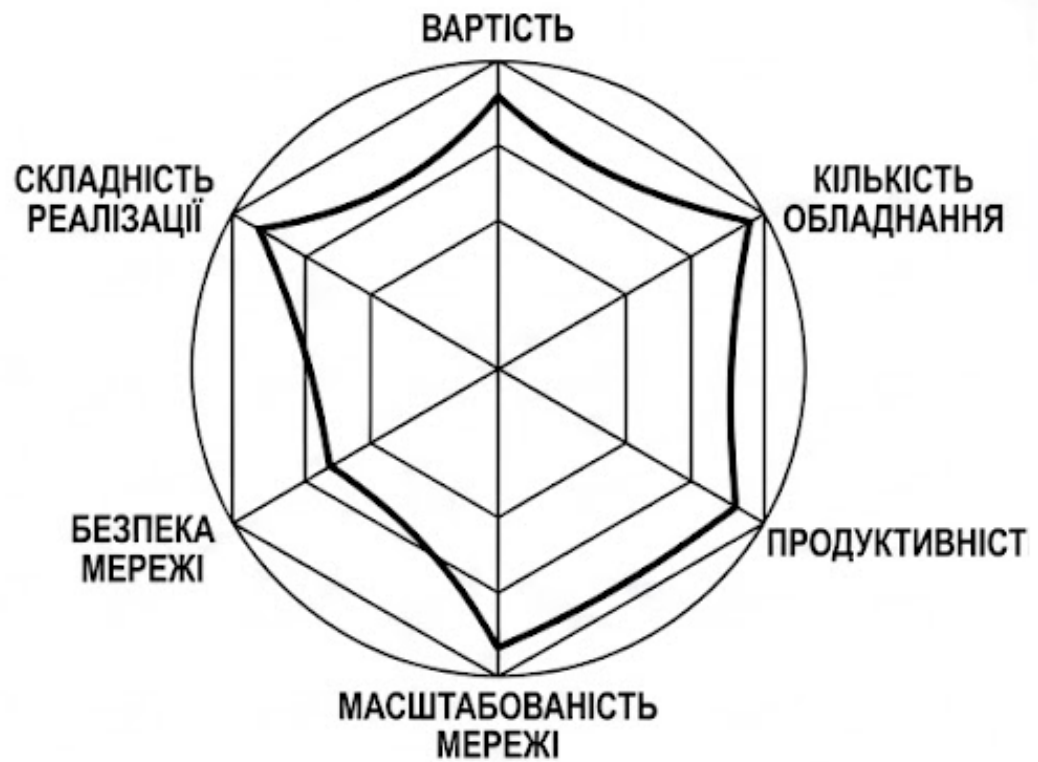


Рисунок 2.2 - Лікарня

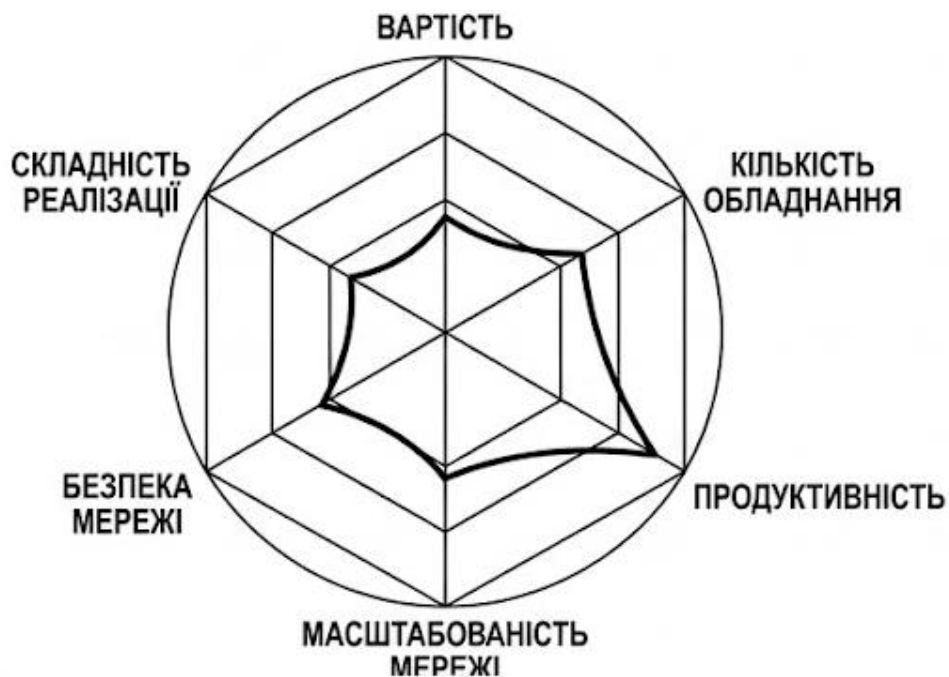


Рисунок 2.3 - Бездротовий міст

Наведені міркування та аналіз практичних прикладів засвідчують суттєве відставання науково обґрунтованої методології проектування від потреб сучасної практики. Це зумовлює необхідність розробки математичних моделей, що слугуватимуть основою для алгоритмів оптимального проектування бездротових мереж. Окремі аспекти цієї актуальної наукомісткої проблеми розглядаються у цьому розділі.

2.1 Дослідження моделі управління трафіком у бездротових мережах

На етапі опрацювання проектних рішень замовники насамперед фокусуються на питаннях забезпечення необхідних обсягів та швидкості передачі даних. Висока ефективність методів математичного моделювання для вирішення таких завдань є беззаперечною. Проте сучасні інструменти моделювання бездротових мереж дозволяють враховувати лише обмежену кількість параметрів трафіку та не повною мірою вирішують завдання його ефективного управління та розподілу. Це створює потребу в нових моделях, здатних забезпечити високу якість обслуговування (QoS) з урахуванням специфічних вимог додатків, що підкреслює актуальність та практичну цінність даного дослідження.

Попри значну увагу з боку наукової спільноти (зокрема таких вчених, як Л. Клейнрок, D. Grossman, Л. Н. Беркман, З. Ванг, а також дослідницьких центрів, як-от Mobile Ad-hoc Networks та Center for Embedded Networked Sensing), завдання розробки моделей трафіку, що точно відображають функціонування мереж у реальних умовах, залишається остаточно не вирішеним.

Якість управління та розподілу трафіку в спеціалізованій літературі визначається поняттям «якість обслуговування» (Quality of Service, QoS) - здатністю мережі забезпечувати заданий рівень сервісу для певного типу трафіку в межах визначених технологічних обмежень. Основними параметрами якості обслуговування є:

- смуга пропускання (bandwidth);
- пріоритет (priority);
- затримка передачі даних (delay);
- варіація затримки (jitter);
- втрати пакетів (packet losses).

Для визначення оптимального інструментарію моделювання доцільно проаналізувати типові проблеми, що виникають під час пікових навантажень мережі. Перевантаження зумовлюється або недостатньою продуктивністю процесорного блока мережевого пристрою, що призводить до накопичення фрагментів у вхідних чергах, або обмеженою пропускнуою здатністю вихідного інтерфейсу, що спричиняє утворення вихідних черг.

Крім того, неоднорідність топології мережі та нерівномірне навантаження на центральні вузли (кластери) призводять до дисбалансу ресурсів шлюзових вузлів. Це спричиняє додаткові затримки передачі та знижує ефективність міжкластерного обміну.

Зазначені чинники дозволяють розглядати бездротову передачу даних як процес функціонування системи масового обслуговування. Відповідно, для моделювання управління та розподілу трафіку доцільно застосовувати алгоритми керування чергами та методи реконфігурації кластерів.

У межах даного дослідження пропонується використання алгоритму керування чергами на основі параметричної ідентифікації. Цей підхід дозволяє ідентифікувати параметри математичної моделі, використовуючи виключно значення вікна передачі даних, що сприяє запобіганню

переповненню буферів, мінімізації втрат пакетів та підвищенню ефективності розподілу каналів зв'язку.

Нижче наведено приклад нелінійного диференціального рівняння першого порядку, що описує динаміку швидкості передачі даних у бездротовій мережі для цілей управління довжиною буферної черги:

$$y'(t) + \alpha p(t)y^2(t) = \beta R^{-1}(1 - p(t)), \quad (2.1)$$

де $y(t)$ - швидкість передачі даних (пак./с);

$p(t)$ - функція ймовірності втрати пакетів;

R - затримка (с.);

α - параметр зменшення розміру вікна передачі при втраті пакету;

β - параметр адитивного збільшення розміру вікна при відсутності втрати пакетів.

У роботі, з якої запозичено це рівняння, функцію втрат пакетів $p(t)$ запропоновано розглядати як періодичну, що змінюється за синусоїдальним законом.

Рівняння (2.1) належить до сімейства рівнянь Ріккаті, аналітичне розв'язання яких у квадратурах, як правило, є неможливим. З огляду на це, актуальним завданням є оцінка вигляду розв'язку та дослідження його властивостей.

Відомо, що загальне рівняння Ріккаті тісно пов'язане з лінійними диференціальними рівняннями другого порядку. Зокрема, якщо коефіцієнт при квадратичному члені є неперервно диференційовною функцією, то будь-який розв'язок $y(t)$ рівняння Ріккаті може бути представлений за допомогою відповідного перетворення.

$$u = \exp\left(\alpha \int p(t) y dt\right) \quad (2.2)$$

Рішення лінійного диференціального рівняння, що відмінне від нуля представиться відповідно:

$$\alpha p(t)u'' + \alpha p'(t)u' + \frac{\alpha^2 \beta}{R} R^2(t)(1 - p(t))u' = 0. \quad (2.3)$$

Згідно із загальною теорією лінійних диференціальних рівнянь, вигляд розв'язку рівняння другого порядку визначається типом коренів його характеристичного полінома. У випадку, коли корені є комплексно-спряженими числами, загальний розв'язок рівняння набуває вигляду сімейства гармонійних функцій:

$$u = e^{at} (c_1 \cos bt - c_2 \sin bt), \quad (2.4)$$

де a - коефіцієнт при дійсній частині коренів,

b - модуль коефіцієнтів при уявній частині.

Умовою існування такого рішення для рівняння (2.3) буде виконання нерівності

$$(p'(t))^2 - \frac{\alpha\beta}{R} p^3(t)(1-p(t))^2 < 0. \quad (2.5)$$

Оскільки коефіцієнт рівняння (2.3) також є гармонійною функцією, формуються передумови для виникнення параметричного резонансу, що може призвести до суттєвих коливань трафіку. Це створює ризик серйозних порушень у функціонуванні бездротової мережі та вимагає оперативного втручання адміністратора.

Дослідження технічних систем, схильних до параметричного резонансу, є складним і трудомістким процесом. Варто зазначити, що розв'язок рівняння (2.3) надзвичайно чутливий до змін параметрів α та β . Навіть незначні флуктуації цих параметрів можуть перевести стабільну систему в режим параметричного резонансу та дестабілізувати її роботу. Для забезпечення успішної експлуатації таких систем необхідно визначити межі резонансних областей, що досягається шляхом побудови діаграм Айнса-Стретта (див., наприклад, [2]). Це здійснюється через аналіз результатів натурних експериментів або за допомогою імітаційного моделювання.

Рівняння (2.1) не є оптимальним інструментом для управління трафіком у бездротових мережах, проте воно ефективно для опису поведінки мережі за умов змінного зовнішнього середовища. У даній роботі це рівняння

застосовано для оцінки впливу частотних змін функції ймовірності втрат пакетів на стан трафіку.

Для рівняння (2.1) було сформульовано задачу Коші з початковими умовами $y(t_0)=0$, $t_0=0$. Чисельний розв'язок отримано за допомогою програмної реалізації методу Рунге-Кутти. Графіки відповідних інтегральних кривих наведено на рисунках 2.4 а–г.

Аналіз отриманих результатів демонструє характер змін при зростанні частоти. На частоті 2 Гц (рис. 2.4а) спостерігається виражений пік, що свідчить про наближення до області параметричного резонансу. Зі збільшенням частоти до 5 Гц (рис. 2.4б) пік нівелюється, що пояснюється віддаленням від резонансної області, попри збереження значної амплітуди регулярних коливань. При подальшому збільшенні частоти (рис. 2.4в-г) амплітуда коливань поступово знижується, досягаючи на частоті 9 Гц значень, що не впливають суттєво на стан трафіку.

Варто зауважити, що у разі зміни параметрів «вікна» або часу затримки R вигляд інтегральних кривих може суттєво відрізнятись.

Під час проектування бездротової мережі доцільно передбачити використання різних алгоритмів управління чергами, зокрема FIFO, алгоритмів пріоритетного обслуговування або зважених черг.

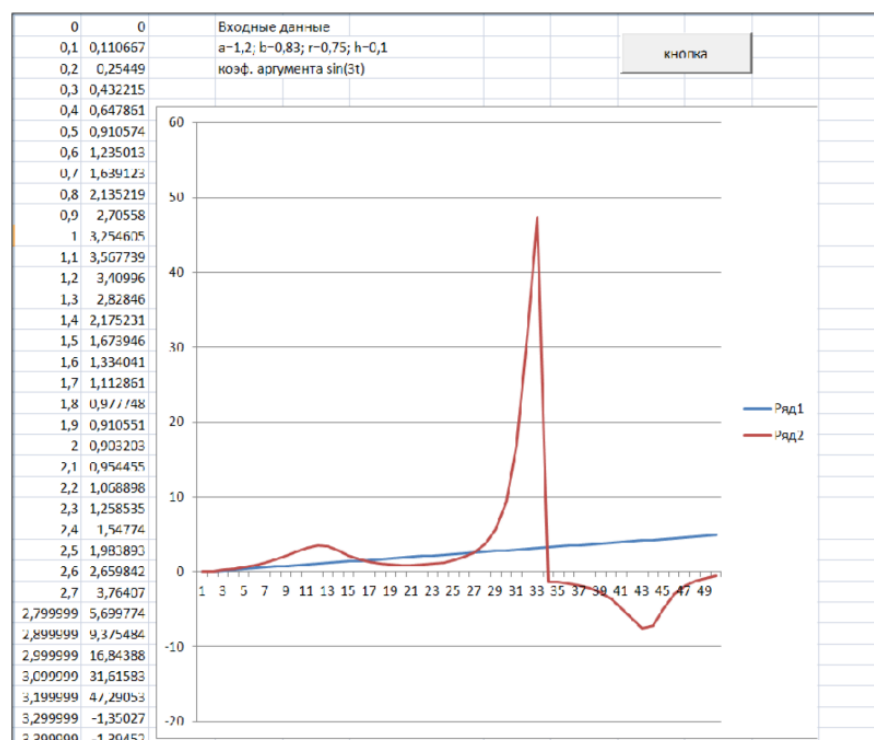


Рисунок 2.4а - Графік інтегральної кривої

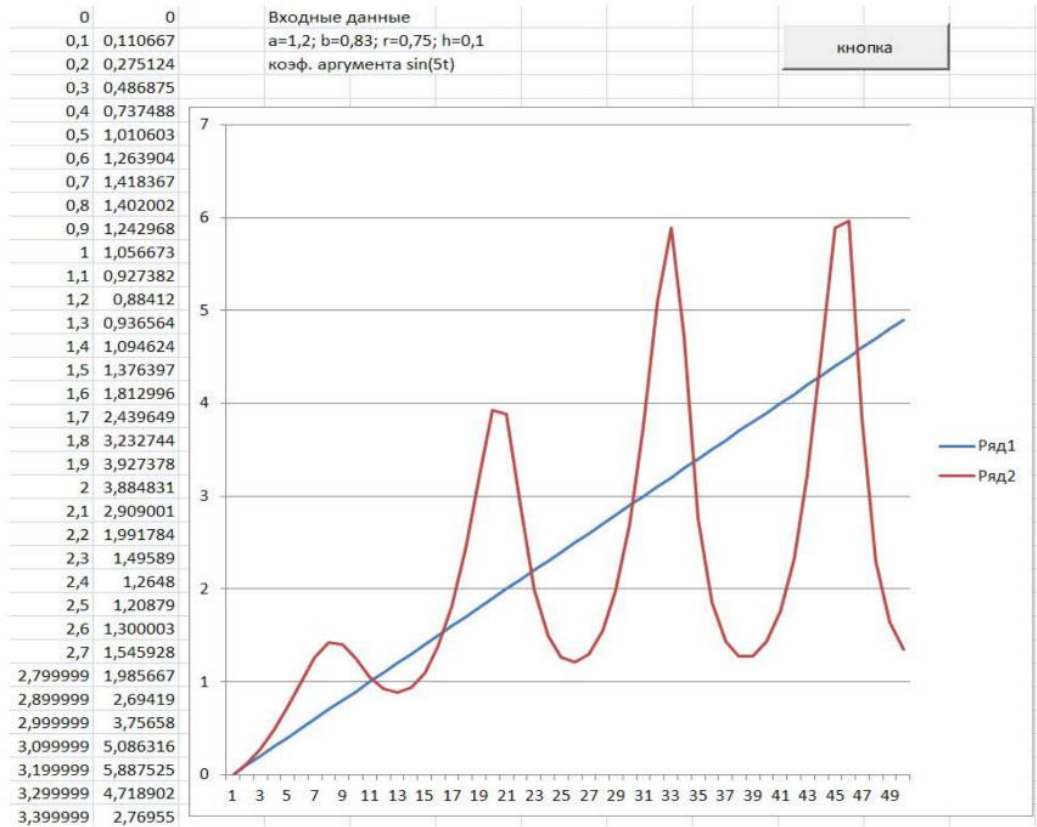


Рисунок 2.4б - Графік інтегральної кривої

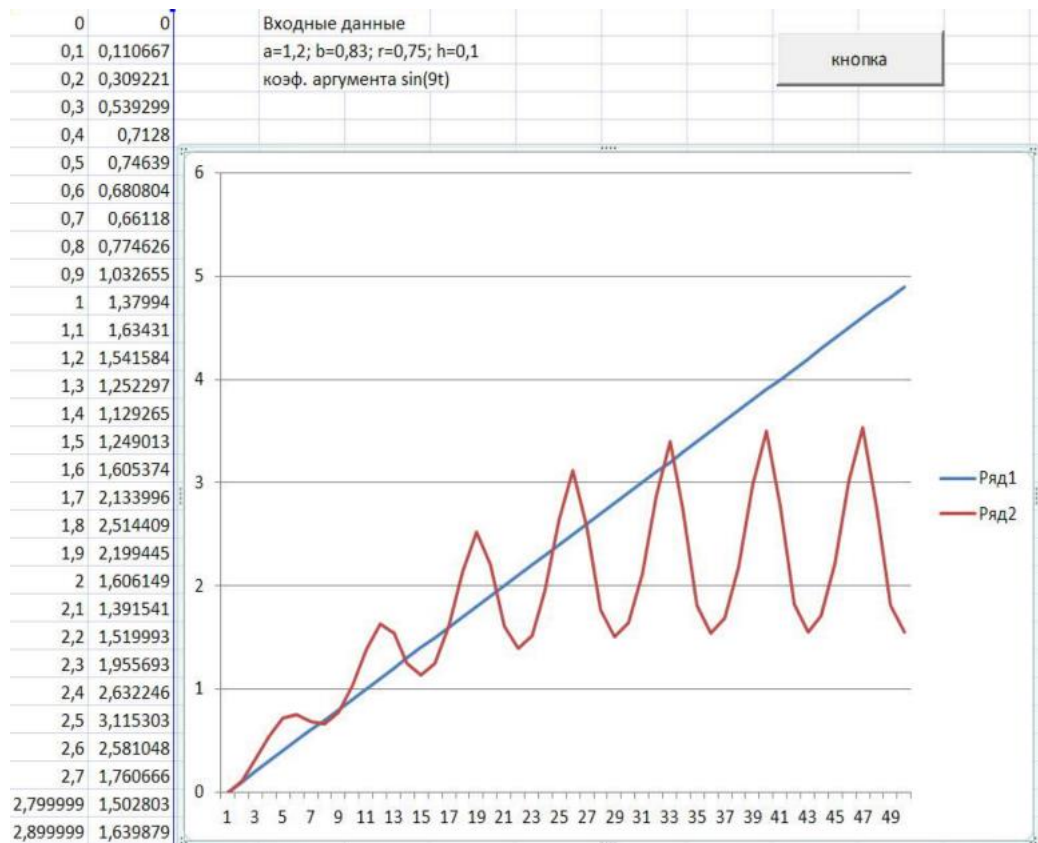


Рисунок 2.4в - Графік інтегральної кривої

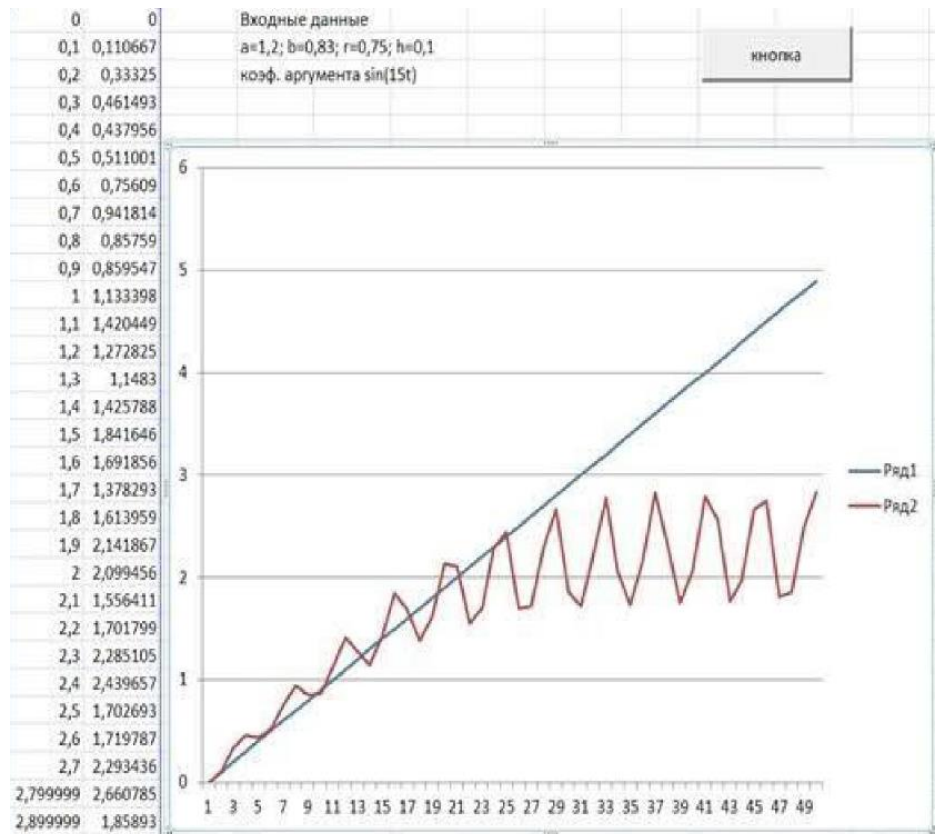


Рисунок 2.4г - Графік інтегральної кривої

Пропонується наступна послідовність дій:

1) розрахунок періоду генерації:

$$\tau = \frac{1}{f}, \quad (2.6)$$

де τ - період генерації;

f - частота роботи мережі.

2) розрахунок швидкості роботи в мережі:

$$b = \frac{1}{m}, \quad (2.7)$$

де b - середній час обслуговування;

m - швидкість передачі даних.

3) розрахунок пропускну здатності каналів:

$$C = \sum_{k=1}^k \frac{1}{t}, \quad (2.8)$$

де C - пропускна здатність;

t - час затримки;

k - кількість каналів.

Проведення порівняльного аналізу згідно із запропонованим алгоритмом дозволить здійснити обґрунтований вибір обладнання для побудови бездротової мережі. Це забезпечить мінімізацію затримок при передачі даних, ефективне управління розподілом трафіку, а також сприятиме вибору оптимального методу чергування для вирішення складних завдань.

Розглянемо особливості моделювання трафіку з використанням механізму реконфігурації кластерів.

У процесі моделювання трафіку бездротових мереж, зокрема для установ державного сектору, освітніх закладів або медичних установ, доцільно передбачити можливість реконфігурації кластерів. Це дозволить скоротити час передачі даних та оптимізувати мережевий трафік. Критерієм вибору є коефіцієнт ефективності:

$$E = \frac{W_k}{W_k + W_s}, \quad (2.9)$$

де W_k – обсяг корисних даних;

W_s – обсяг службової інформації.

Очевидно, що за умови фіксованого обсягу корисних даних коефіцієнт ефективності монотонно знижується зі зростанням службового трафіку. Отже, ключовим параметром підвищення ефективності мережі є мінімізація обсягу службового трафіку. Визначимо фактори, що впливають на цей показник у бездротових комп'ютерних мережах.

Обсяг службового трафіку можна представити як функцію $V_s = f(F_r, V_0)$, де F_r - частота реконфігурації мережі, а V_0 - кількість вузлів у кластері.

Зі зростанням частоти реконфігурацій обсяг службового трафіку збільшується за нелінійним законом, що призводить до значного зниження

ефективності передачі даних. За певних умов це може зумовити нестабільну роботу мережі.

Таким чином, для мінімізації службового трафіку на заданому інтервалі часу ΔT частота реконфігурацій та кількість кластерів мережі мають бути мінімізовані:

$$F_{r \rightarrow \min}, V_{0 \rightarrow \min}$$

Оптимальний розмір мережі визначається за допомогою коефіцієнта k

$$k = \frac{F_r \cdot V_o}{\Delta T}, k \rightarrow \min.$$

Незалежно від обраного математичного інструментарію для управління та розподілу трафіку в бездротових комп'ютерних мережах, обов'язковою умовою є верифікація розробленої моделі. Для цього доцільно порівняти показники модельного трафіку з еталонними значеннями. Ефективним інструментом для вирішення таких завдань є коефіцієнт конкордації $p(t_k)$, що відображає ступінь відповідності модельних даних еталонним на заданому часовому інтервалі:

$$p(t_k) = \frac{2 \cdot m(t_k) \cdot M(t_k)}{m(t_k)^2 + M(t_k)^2}, \quad (2.10)$$

де t_k - k -ий момент часу контролю трафіку;

$m(t_k)$ - математичне очікування еталонного трафіку;

$M(t_k)$ - математичне очікування модельного трафіку.

Для дискретного випадку застосовується середнє значення критерію конкордації:

$$p_0(Z_1, Z_n) = \sum_{t_k=0}^1 \frac{2 \cdot m(t_k) \cdot M(t_k)}{m(t_k)^2 + M(t_k)^2}, \quad (2.11)$$

де Z_1, Z_n - оптимальні квантовані значення моделі трафіку розмірності n .

Для неперервного випадку вводиться інтегральний критерій конкордації моделі та еталона нестационарного трафіку:

$$p_0(Z_1, Z_n) = \int_0^1 \frac{2 \cdot m(t_k) \cdot M(t_k)}{m(t_k)^2 + M(t_k)^2} dt_k \quad (2.12)$$

Значення коефіцієнта конкордації варіюється в діапазоні від 0 до 1.

Згідно з результатами проведених автором досліджень та моніторингу роботи комп'ютерних мереж, стан системи визнається задовільним при значенні коефіцієнта конкордації $\geq 0,9$.

На підставі викладеного вище можна зробити такі висновки:

- 1) з метою вибору оптимального математичного апарату для моделювання розподілу та управління трафіком у бездротових комп'ютерних мережах проведено аналіз факторів, що спричиняють затримки передачі даних;
- 2) обґрунтовано необхідність застосування алгоритмів управління чергами та методів реконфігурації кластерів;
- 3) доведено доцільність використання коефіцієнта конкордації як інструмента верифікації для порівняння модельного трафіку з еталонними показниками.

2.2 Застосування бездротових мереж в навчальних установах

Впровадження дистанційних технологій в освітній процес передбачає створення інноваційного контенту, який доповнює або заміщує традиційні навчальні матеріали, а також впровадження ефективних механізмів його дистрибуції. Розвиток локальних та глобальних обчислювальних мереж суттєво підвищив доступність електронних освітніх ресурсів, що стало новим етапом у поширенні дистанційного навчання. Наразі заклади освіти різних рівнів активно інтегрують у навчальні програми інформаційні ресурси, розміщені як у локальних мережах установ, так і у мережі Інтернет.

Відтак, освітні установи прагнуть забезпечити студентам цілодобовий доступ до електронних ресурсів, зокрема через організацію бездротових мереж (Wi-Fi), що дозволяє вийти за межі використання спеціалізованих комп'ютерних класів чи бібліотек.

Незважаючи на широкий вибір обладнання для побудови мереж Wi-Fi та маркетингові твердження про простоту їх розгортання, забезпечення безпечної та високоефективної роботи таких мереж потребує професійного підходу. Проектування мережевої інфраструктури вимагає врахування специфічних характеристик обладнання та фізичних особливостей приміщень. Відповідно, запорукою надійної експлуатації є попередній технічний аналіз і детальний розрахунок параметрів мережі.

Функціонування мережі Wi-Fi базується на обміні даними між клієнтським мобільним пристроєм (ноутбук, планшет, смартфон) та стаціонарним програмно-апаратним комплексом (базовою станцією або бездротовою точкою доступу). Ключовою особливістю такого обладнання є використання електромагнітних коливань надвисокочастотного (НВЧ) діапазону. Рівень випромінювання залежить від характеристик середовища передачі сигналу та умов експлуатації; у певних випадках він може досягати значень, що перевищують встановлені санітарно-гігієнічні норми, що потребує обов'язкового контролю під час проектування мережі.

На сьогоднішній день мережі Wi-Fi переважно функціонують у радіочастотному діапазоні 2,4 ГГц. Рівні електромагнітного випромінювання (ЕМВ) у цьому діапазоні регулюються чинними санітарно-епідеміологічними правилами та нормативами. Відповідно до встановлених вимог, гранично допустимий рівень ЕМВ у діапазоні 300 МГц – 300 ГГц для житлових, громадських та виробничих приміщень становить 10 мкВт/см². Ці нормативи поширюються також на заклади освіти, культури та спорту, що робить дотримання вказаних лімітів обов'язковою умовою при проектуванні мережевої інфраструктури в таких установах.

Сучасне мережеве обладнання часто є універсальним: воно призначене як для локального об'єднання пристроїв, так і для підключення до віддалених мереж на відстані кількох кілометрів. Таке обладнання характеризується значною вихідною потужністю (до 1 - 2 Вт) та використанням антен з високим коефіцієнтом підсилення. Як наслідок, експлуатація подібних пристроїв у приміщеннях освітніх закладів може

призводити до перевищення нормативних показників електромагнітного поля.

Розповсюдження радіохвиль у НВЧ-діапазоні має свою специфіку: ступінь загасання сигналу залежить від матеріалів стін, наявності арматури та металевих конструкцій, які відбивають випромінювання. При проєктуванні мережі важливо враховувати архітектурні особливості будівлі: сигнал від точки доступу може суттєво послаблюватися в сусідніх приміщеннях, тоді як використання відбитого сигналу (наприклад, від стін коридорів) може оптимізувати зону покриття. Тому розробка проектних рішень потребує ретельного аналізу умов експлуатації.

Додатковим фактором, що впливає на рівень випромінювання, є адаптивна потужність мобільних пристроїв. Для забезпечення стійкої передачі даних сучасні пристрої автоматично коригують власну потужність залежно від якості сигналу базової станції. У разі послаблення сигналу потужність випромінювання мобільного пристрою може зростати, що за певних умов здатне перевищити встановлені санітарні норми.

З метою оцінки фактичних значень випромінювання було проведено експериментальне дослідження двох зразків базових станцій та трьох моделей мобільних пристроїв. Вимірювання здійснювалися за допомогою селективного вимірювача SRM-3006 у режимі безперервного обміну пакетами даних (Ping). Для моделювання умов зниження рівня сигналу та оцінки реакції обладнання застосовувалося екранування пристроїв без припинення сеансу зв'язку.

Вимірювані показники щільності потоку енергії становили: для бездротового маршрутизатора TL-WR542G (штатна антена з коефіцієнтом підсилення 5 дБі) - 396,6 мкВт/см²; маршрутизатора ASUS WL-520g - 223 мкВт/см²; планшетного комп'ютера Samsung GT-P7500 - 196 мкВт/см²; смартфона ZTE V970 - 91 мкВт/см²; смартфона Samsung GT-I7500 - 287 мкВт/см². Отримані дані підтверджують, що рівні випромінювання апаратури можуть суттєво перевищувати гранично допустимі значення, встановлені санітарними нормами.

Користувачі мобільних пристроїв можуть опосередковано мінімізувати інтенсивність впливу випромінювання, контролюючи рівень сигналу та оптимізуючи своє розташування у зоні найліпшого прийому мережі.

Водночас планування базових станцій (БС) Wi-Fi у закритих приміщеннях освітніх закладів (навчальних аудиторіях, холах) вимагає суворого дотримання інженерних регламентів щодо розміщення обладнання. Доцільно застосовувати настінне або стельове кріплення антен, уникати їхнього встановлення у безпосередній близькості до робочих місць, використовувати пристрої з регульованою вихідною потужністю та мінімізувати вплив відбиваючих поверхонь, здатних спрямовувати випромінювання на користувачів.

Незважаючи на доцільність використання математичного моделювання при проектуванні бездротових мереж, практична реалізація цього підходу обмежується дефіцитом реалістичних моделей, адаптованих до конкретних розрахункових схем. Це актуалізує потребу в об'єктивізації евристичних рішень, що приймаються під час проектування.

Одним із дієвих інструментів для досягнення поставленої мети є метод експертних оцінок. Він ефективний у задачах багатокритеріальної оптимізації, де кількісна оцінка окремих критеріїв утруднена або відсутня, а також за відсутності загальновизнаного математичного опису.

Методологія ґрунтується на гіпотезі, що сукупний досвід фахівців, набутий шляхом практичної діяльності та емпіричних досліджень, може частково компенсувати брак точних аналітичних моделей. Інтуїтивні здогадки та виявлені сталі закономірності можуть слугувати основою для формування нових науково обґрунтованих алгоритмів.

Для проведення дослідження залучено вісім експертів із досвідом роботи у сфері проектування, впровадження та експлуатації бездротових мереж у закладах освіти (не менше трьох років). Кожен експерт незалежно оцінив за десятибальною шкалою шість техніко-економічних та експлуатаційних характеристик мережі: вартість, кількість обладнання, продуктивність, масштабованість, безпеку та складність реалізації.

Результати експертизи та усереднені оцінки наведені у таблиці 2.1.

Перед початком статистичної обробки результатів експертної оцінки було проведено «круглий стіл», під час якого фахівці проаналізували отримані оціночні відомості. Дискусія дозволила експертам обґрунтувати виставлені бали та сформулювати спільне бачення щодо досліджуваної проблеми.

Нижче наведено резюме результатів обговорення за кожним із оцінюваних показників:

1. Вартість (середній бал - 7,875). Оскільки показник «Кількість обладнання» було винесено в окрему категорію, оцінка вартості ґрунтувалася на актуальних цінах на основне та допоміжне обладнання з урахуванням специфічних вимог замовника. На думку експертів, для організації бездротової мережі у ВНЗ достатньо стандартного обладнання, що відповідає санітарно-гігієнічним нормам. Вихід із ладу окремої точки доступу не призводить до критичної втрати даних чи зупинки навчального процесу, тому додаткові витрати на резервування не є доцільними. Спеціальних вимог до безпеки мережі, які б суттєво підвищували бюджет проєкту, також не висувається. Таким чином, прогнозована вартість оцінюється як помірна.

Таблиця 2.1 - Зведена карта експертних оцінок.

Характеристики мережі	Е К С П Е Р Т И								Середнє значення
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Вартість	8	8	7	8	8	7	9	8	7,875
Кількість обладнання	9	9	10	9	9	9	10	9	9,25
Продуктивність	7	8	8	8	7	9	8	8	7,875
Масштабованість мережі	9	9	8	9	8	9	9	9	8,75
Безпека мережі	6	6	5	7	6	5	5	7	5,75
Складність реалізації	10	9	10	10	9	10	10	9	9,625

2. Кількість обладнання (середній бал - 9,25). Параметр залежить від площі приміщень та кількості студентів. Експерти наголошують: пріоритет високого рівня комфорту користувачів та стабільного рівня сигналу вимагає збільшення кількості точок доступу. Економія на цьому етапі може спричинити неприпустимі проблеми з трафіком та систематичні збої в навчальному процесі.

3. Продуктивність (середній бал - 7,875). Більшість фахівців вважає, що надвисока продуктивність мережі в освітньому середовищі не є обов'язковою. Підвищення продуктивності потребує додаткового

обладнання, що призведе до здорожчання проєкту. Відповідність оцінок вартості та продуктивності підтверджує доцільність балансу між цими показниками.

4. Масштабованість мережі (середній бал - 8,75). Експерти, особливо фахівці з експлуатації бездротових мереж, вважають масштабованість критично важливим фактором для перспективного розвитку. З огляду на розвиток інформаційних технологій, впровадження нових електронних засобів навчання та дистанційної освіти, закладання можливості розширення мережі на стадії проєктування є обов'язковим.

5. Безпека мережі (середній бал - 5,75). Думка експертів була одностайною: до бездротових мереж навчального призначення не висуваються спеціальні вимоги щодо захисту інформації, які потребували б впровадження комплексних заходів безпеки.

6. Складність реалізації (середній бал - 9,625). Експертна група підкреслила високу складність реалізації через архітектурні особливості будівель, вплив будівельних конструкцій на затухання сигналу та необхідність дотримання санітарно-гігієнічних норм. Окремо відзначено складнощі, характерні для історичних будівель (наприклад, об'єктів культурної спадщини XIX - початку XX століття, де розташовані провідні університети України).

На основі даних таблиці 2.1 побудовано діаграму Ківіата для бездротової мережі ВНЗ (рис. 2.5).

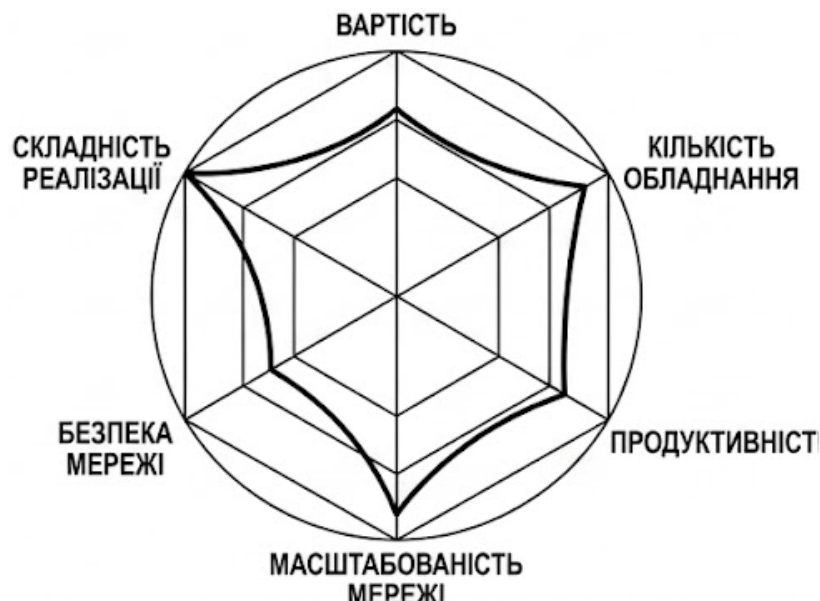


Рисунок 2.5 - Діаграма Ківіата бездротової мережі ВНЗ

Результати анкетування експертної групи підлягають обов'язковій перевірці на узгодженість. У разі виявлення істотних розбіжностей у думках експертів результати експертизи вважаються недостатніми для формування обґрунтованих висновків, а процедуру визнають нерезультативною. Така ситуація може бути зумовлена значною різницею у кваліфікації фахівців або відсутністю в професійному середовищі загальновизнаних критеріїв оцінювання досліджуваної проблеми. У першому випадку проблему можна вирішити шляхом залучення нової групи експертів; у другому - констатується, що предмет дослідження потребує подальшої наукової дискусії, а не експертної оцінки.

Стандартним методом верифікації узгодженості експертних оцінок є розрахунок коефіцієнта множинної рангової кореляції Кендалла–Сміта з подальшою перевіркою його статистичної значущості.

Процедура оцінювання передбачає ранжування отриманих результатів: найвищому показнику присвоюється ранг 1, наступному - 2 тощо. При однакових оцінках показникам присвоюються зв'язані ранги, що дорівнюють середньому арифметичному їхніх порядкових номерів.

Алгоритм ранжування розглянемо на прикладі оцінок першого експерта. Показник «Складність реалізації» отримав найвищу оцінку (10 балів), тому йому присвоєно ранг 1. Показники «Кількість обладнання» та «Масштабованість» оцінені в 9 балів; оскільки вони займають 2-й та 3-й порядкові номери, обом присвоюється ранг 2,5. Наступний показник «Вартість» (8 балів) отримує ранг 4, показник «Продуктивність» — ранг 5, а «Безпека мережі» — ранг 6.

Зведені результати ранжування наведено в таблиці 2.2.

Розрахунок коефіцієнта Кендалла-Сміта K проводиться за співвідношенням:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2}{\frac{1}{12} \cdot \left(m^2 (n^3 - n) - m \cdot \sum_{j=1}^m T_j \right)}, \quad (2.13)$$

де r_{ij} - ранг i -го показника у j -го експерта;

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}}{n},$$

де n - число показників; m - число експертів у складі групи; $T_j = v_j \cdot 3 - T_j$.

де v_j - кількість однакових пов'язаних рангів, виставлених j -м експертом.

Таблиця 2.2 - Зведена карта рангових оцінок.

Характеристики мережі	Е К С П Е Р Т И								Сума рангів
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Вартість	4	4,5	5	4,5	3,5	5	3,5	4,5	34,5
Кількість обладнання	2,5	2	1,5	2,5	1,5	3	1,5	2	16,5
Продуктивність	5	4,5	3,5	4,5	5	3	5	4,5	35
Масштабованість мережі	2,5	2	3,5	2,5	3,5	3	3,5	2	22,5
Безпека мережі	6	6	6	6	6	6	6	6	48
Складність реалізації	1	2	1,5	1	1,5	1	1,5	2	11,5

Використовуючи співвідношення (2.12) отримаємо

$$K = \frac{926}{\frac{1}{12} \cdot (64,210 - 8.90)} = 0,874.$$

Високе значення коефіцієнта вказує на належний рівень узгодженості експертних оцінок. Для підтвердження цього результату необхідно здійснити статистичну перевірку гіпотези про узгодженість думок експертів за допомогою критерію Пірсона χ^2 . З цією метою обчислимо значення критерію для рангового масиву, наведеного в таблиці 2.2, згідно з відповідною формулою.

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2}{\frac{1}{12} \cdot \left(mn \cdot (n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m T_j \right)}. \quad (2.14)$$

Застосувавши наведену формулу, отримано значення критерію $x^2 = 34,9$. Порівняння цього показника з табличним значенням для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та числа ступенів свободи $f=n-1$, $x^2=11,1$ свідчить, що розрахункова величина перевищує критичну. Отже, гіпотезу про узгодженість експертних оцінок підтверджено, що дозволяє використовувати отримані результати для формування технічних вимог до проєктування бездротової комп'ютерної мережі закладу вищої освіти.

Таким чином було запропоновано математичну модель управління трафіком у бездротових мережах. Докладно проаналізовано особливості проєктування бездротових мереж, призначених для забезпечення навчального процесу у ВНЗ. Організовано роботу групи незалежних експертів з оцінювання техніко-економічних характеристик бездротових мереж, результати якої верифіковано із застосуванням відомих статистичних процедур.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄДНАННЯ КАНАЛІВ НА ОСНОВІ АГРЕГАЦІЇ ДЛЯ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖ 802.11AC

Бездротові локальні мережі з обмеженим радіусом дії (SR-WLAN) забезпечують високу швидкість передачі даних при мінімальному енергоспоживанні. Дані мережеві конфігурації, що охоплюють офісні та автомобільні сегменти, набули широкого розповсюдження. Оптимізація повторного використання частотних каналів дозволяє масштабувати ці мережі, а впровадження стандарту IEEE 802.11ac з використанням технології об'єднання каналів (channel bonding) сприяє підвищенню продуктивності мультимедійних додатків.

Динамічне керування шириною каналу (DBCA) забезпечує ефективний розподіл пропускної здатності залежно від поточного навантаження. У цій архітектурі передбачено використання основного каналу для керування пристроями, що не підтримують агрегацію, та додаткових каналів для нарощування загальної пропускної здатності. Водночас зростання щільності мереж, що використовують об'єднання каналів, підвищує ризик виникнення зовнішніх інтерференцій, які можуть призвести до втрати пакетів даних. Дослідження продуктивності SR-WLAN в умовах таких перешкод є критично важливим для забезпечення якості зв'язку [1, 2, 3].

Аналітичне моделювання дозволяє оцінити ефективність методів доступу до середовища та вплив взаємних перешкод залежно від щільності розміщення бездротових станцій (STA). Дослідження показують, що в умовах високої щільності (наприклад, у багатоквартирних будинках) використання спектра 2,4 ГГц стає неефективним через перекриття каналів і конкуренцію між протоколами. Впровадження алгоритмів децентралізованої або централізованої координації, а також перехід на діапазон 5 ГГц та використання стандарту 802.11ac дозволяють мінімізувати колізії та оптимізувати пропускну здатність [4, 5, 6, 7].

З погляду системної архітектури, технологія агрегації кадрів (A-MPDU/MSDU) суттєво знижує накладні витрати рівня MAC, що є критично важливим для передачі великих обсягів даних. Однак ефективність об'єднання каналів та агрегації залежить від специфіки трафіку: додатки реального часу,

що генерують дрібні пакети, потребують іншого підходу до розподілу ресурсів порівняно з потоковою передачею файлів.

Практичні дослідження вказують на те, що навіть за умови використання неперекривних каналів (наприклад, 1, 6 та 11 у стандарті 802.11n) виникають інтерференції, зумовлені недосконалістю спектральних масок та нестабільністю передавачів. Таким чином, сучасні рішення, що базуються на 802.11ac та 802.11ax, вимагають прискіпливого налаштування алгоритмів керування частотним ресурсом для забезпечення балансу між високою пропускною здатністю та стабільністю функціонування в умовах високої щільності мережевих пристроїв [8].

3.1 Особливості технології об'єднання каналів (channel bonding)

Ранні версії стандарту IEEE 802.11, включаючи базові та варіативні специфікації, базувалися на фіксованій ширині каналу 20 МГц. Наступні ітерації, зокрема IEEE 802.11n/ac, запровадили гнучкі налаштування ширини смуги пропускання. З метою мінімізації інтерференції між точками доступу (AP), алгоритми розподілу каналів (Channel Assignment, CA) забезпечують використання несуміжних частотних діапазонів.

Агрегація каналів (Channel Bonding, CB) або агрегація несучих (Carrier Aggregation, CA) дозволяє об'єднувати декілька частотних блоків для збільшення пропускної здатності на одного користувача. У сучасних версіях стандарту можливо використовувати смуги шириною 40, 80 та 160 МГц. Хоча це підвищує швидкість передачі даних, водночас зростає складність керування мережею та ризик виникнення конфліктів через накладання сигналів у фрагментованому спектрі.

Для вирішення завдань оптимізації CA застосовуються різноманітні підходи: від модельно-орієнтованих методів до алгоритмів машинного навчання (ML). Зокрема, використання графових нейронних мереж (GNN) дозволяє ефективно моделювати складні взаємодії між точками доступу, враховуючи перешкоди та активність сусідніх вузлів. Попередні дослідження демонструють, що інтеграція ML-моделей у системи керування WLAN забезпечує можливість оптимізації в режимі реального часу, мінімізуючи колізії в регіонах з високим рівнем трафіку.

У межах наукових досліджень розглядаються гібридні підходи, що поєднують аналітичні моделі (наприклад, мережі Маркова) з евристичними алгоритмами та методами навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning). Такі рішення, як вибірка Томпсона чи використання багаторуких бандитів (Multi-Armed Bandits), дозволяють адаптивно розподіляти ресурси та оптимізувати пропускну здатність каналів.

Аналіз ефективності об'єднання каналів вказує на те, що при передачі малих кадрів переваги від збільшення ширини каналу можуть нівелюватися накладними витратами. Ефективність впровадження таких архітектурних рішень залежить від точності оцінки стану каналу, що потребує інтеграції інтелектуальних систем моніторингу та прогнозування, здатних враховувати специфіку середовища передачі даних та топологію мережі.

Для моделювання наслідків обмеженості ресурсів у бездротових локальних мережах (WLAN) використовується модель Марковського ланцюга з взаємодією між вузлами. Стандарт IEEE 802.11ac, зокрема, моделюється для вивчення перевантажених WLAN, спираючись на його базові топологічні характеристики. Це дозволяє дослідникам оцінювати ефективність об'єднання каналів у різних конфігураціях [12].

На основі цих результатів розробляються евристичні методи вибору каналів. Крім того, існує другий клас алгоритмів, які динамічно коригують налаштування каналів у реальному часі, використовуючи зібрані дані. Ці дані відстежуються центральним контролером і оновлюють матрицю, що відображає оцінене завантаження кожного каналу точкою доступу.

Ще один підхід до вирішення проблеми перевантаження в режимі реального часу полягає в оптимізації використання всіх доступних каналів. Ця стратегія базується на аналізі активності каналів. Чим більше даних передається через канал за певний проміжок часу, тим вищий його "показник задоволеності". Якщо цей показник високий, канал залишається без змін; якщо низький – його налаштування коригуються.

Запропонований метод, що базується на каскадному аналізі (CA), спрямований на підвищення пропускну здатності каналів та, як наслідок, загальної продуктивності мережі. Машинне навчання (ML), зокрема з використанням нейронних мереж та ланцюгів Маркова, може значно сприяти каскадному аналізу, допомагаючи прогнозувати роботу точок доступу (AP). Потім канали та точки доступу розподіляються між двома алгоритмами

навчання з підкріпленням. У результаті, перевантажена WLAN досліджується в реальному часі [13].

Графові згорткові мережі використовуються для виявлення взаємозв'язків між точками доступу на основі виявлення несучої. Потім каскадний аналіз застосовується до даних, отриманих від нейронної мережі. Автори використовують методи вибірки Томпсона та багаторуких бандитів для пошуку оптимальних комбінацій. Це дозволяє контролювати каскадний аналіз та обмін даними між точками доступу та клієнтськими пристроями, враховуючи різноманітні призначення та ширини каналів.

Простір можливих рішень має два виміри: канал та його ширина. Наш підхід спрощує задачу каскадного аналізу шляхом проведення досліджень. Важливо зазначити, що можливості оцінюються за допомогою аналітичної моделі, що може бути ключовим фактором для забезпечення стабільної роботи мережі.

Об'єднання каналів у стандарті 802.11ac для передачі малих пакетів даних є неефективним. Оскільки час передачі службової інформації не залежить від ширини каналу, це суттєво впливає на загальну продуктивність. Революційним підходом є одночасна трансляція даних як на основний, так і на додатковий канали. Наприклад, на рисунку 3.1 показано двовимірну конфігурацію Wi-Fi для поверху з 8 аудиторіями, 8 точками доступу та 24 каналами. Кожна точка доступу використовує три канали, позначені чорними квадратами. Червоні сегменти вказують на сигнали, що створюють перешкоди між точками доступу та клієнтськими пристроями (AP-STA) [14].

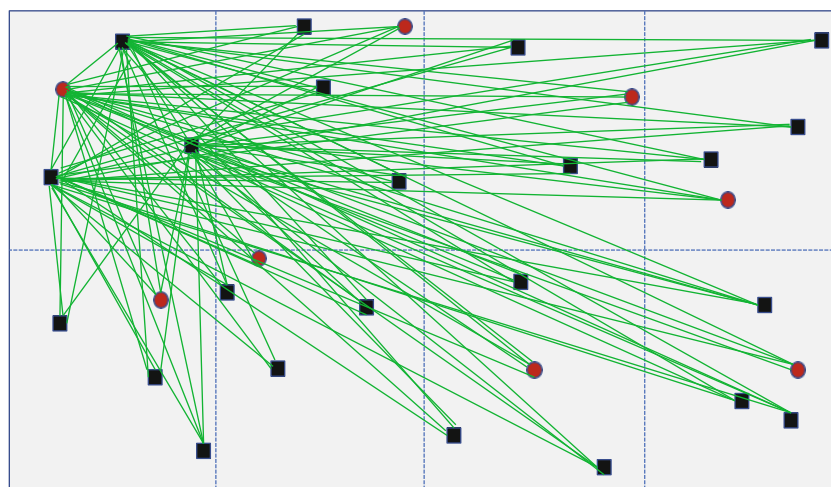


Рисунок 3.1 - Графічне зображення досліджуваної мережі Wi-Fi

Ця стратегія спрямована на покращення комунікації між пристроями різними способами. Коли об'єднуються кілька невеликих каналів, дослідження оцінює, який обсяг трафіку може бути оброблений кожним каналом. Також вивчається надмірне використання спектру в екстрених ситуаціях, що може бути небажаним. Цей підхід узагальнює результати досліджень для кращого розуміння динаміки мережі.

Важливою складовою є аналіз взаємодії між точками доступу та клієнтськими пристроями. Виявлення несучої допомагає зрозуміти, які канали зайняті та як вони впливають на продуктивність. Графові згорткові мережі ефективно моделюють ці взаємозв'язки, дозволяючи виявити складні залежності.

3.2 Запропонований метод об'єднання каналів

Сучасні мережі стандарту 802.11ac отримали можливість працювати на ширших частотних діапазонах, ніж раніше. Це означає, що стандартний канал шириною 20 МГц тепер можна розділити на два, чотири або навіть вісім менших каналів, що дозволяє системі функціонувати ефективніше. Такий підхід особливо добре зарекомендував себе для каналів шириною 20 і 40 МГц, як це демонструє рис. 3.2.

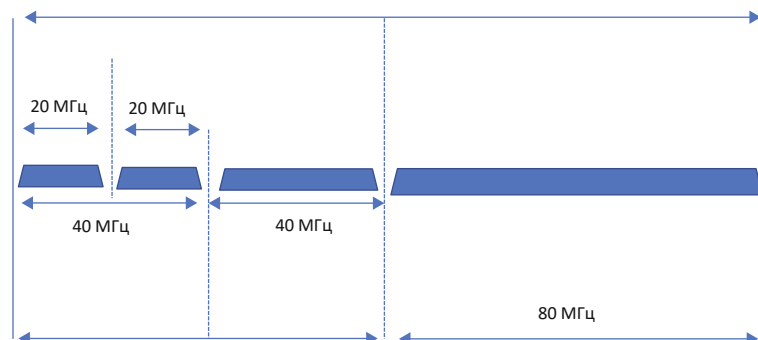


Рисунок 3.2 - У стандарті 802.11ac є два основних канали та два додаткові канали

На частоті 80 МГц кількість доступних основних та допоміжних каналів значно зростає. Стандарт 802.11ac використовує два основні та два допоміжні канали. Важливою передумовою для ефективної роботи є перевірка того, що допоміжний канал не зайнятий іншими пристроями [10].

Проблеми та рішення при використанні ширших каналів

У діапазоні 40 МГц кілька радіопристроїв можуть конкурувати за один і той самий простір. Допоміжний канал часто використовувався в попередніх версіях протоколів. Як було зазначено, передача даних BT2 відбувається саме на частоті 40 МГц.

Об'єднання каналів – це технологія Wi-Fi, яка дозволяє збільшити швидкість передачі даних шляхом використання ширших частотних каналів. Однак, у діапазоні 2,4 ГГц доступно лише два канали шириною 40 МГц. Згідно з результатами досліджень, об'єднання каналів на цій частоті не є рекомендованим рішенням.

Для мережі WLAN шириною 40 МГц процес доступу до каналу та передачі даних вимагає виконання певних кроків. Ймовірно, другий канал буде вільним. Як показано на рис. 3.3, було передано резервний кадр 40 МГц. Цей приклад ілюструє, як мережа WLAN на частоті 40 МГц здійснює доступ до каналу та передачу даних, не створюючи перешкод для основних мереж інших пристроїв та допоміжних каналів.

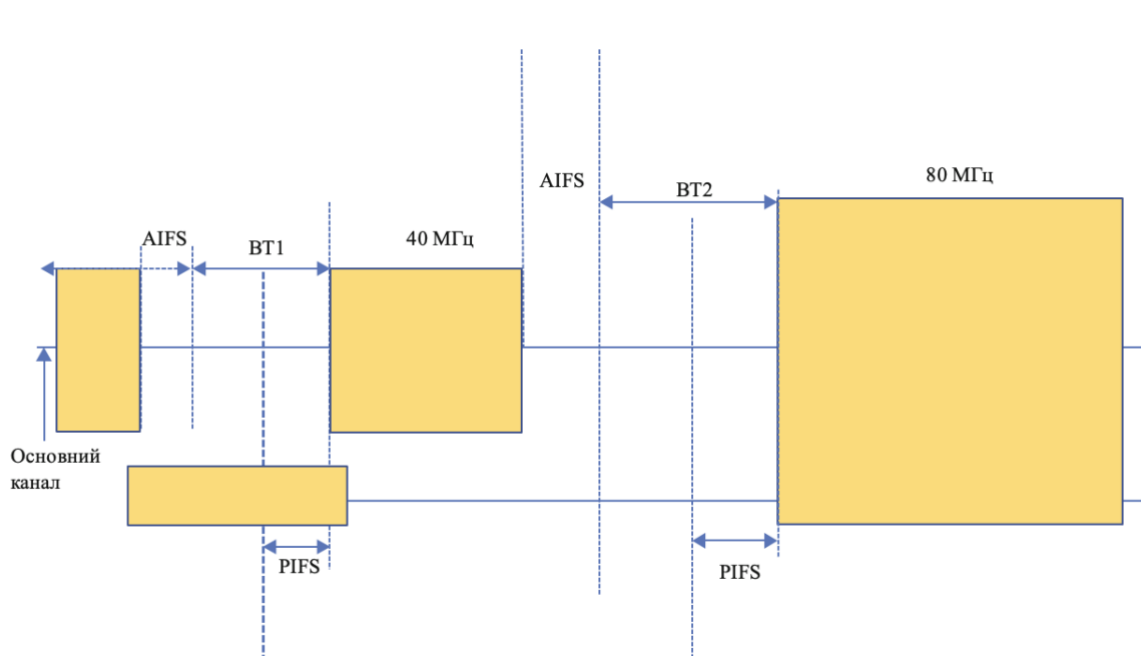


Рисунок 3.3 - Мережа WLAN, що працює на частоті 40 МГц, доступ до каналу та передача даних

Рекомендується уникати використання резервних мереж Wi-Fi з шириною

смуги 20 МГц. Тому всі мережі WLAN повинні використовувати однакові основний та допоміжний канали [15]. Після успішного доступу до основного каналу, можна отримати доступ і до інших. Як альтернатива, можна тимчасово відключити мережене з'єднання.

3.3 Моделювання роботи Wi-Fi у будинку

У цьому дослідженні було проведено оцінку об'єднання каналів з використанням моделі п'ятиповерхового будинку. Розміри будівлі становлять 40 метрів у довжину та ширину, а висота кожного поверху – 3 метри. На кожному поверсі розташовано вісім аудиторій. У цьому сценарії щільність пристроїв (STA) на точку доступу (AP) варіювалася від менш ніж одного до понад дванадцяти.

Модель передбачає, що всі точки доступу та пристрої розташовані на плоскій поверхні, а їх координати по осях x та y розподілені випадково. Розподіл по осі z використовує нормальний розподіл із середнім значенням 1,5 метра та стандартним відхиленням 0,5 метра.

У кожному сценарії дослідження задіяно 40 аудиторій та 40 точок доступу (AP). Для кожного з 6 змодельованих планів розгортання було проаналізовано п'ять конфігурацій Wi-Fi-обладнання. Візуалізація з'єднань між точками доступу та STA забезпечує наочність представлених ситуацій. Моделювання здійснювалося за допомогою програмного середовища NS-3.

Аналіз засвідчив, що навіть за низької щільності користувачів використання широкосмугових каналів є менш ефективним порівняно з застосуванням більшої кількості ортогональних каналів. Продуктивність мережі може бути підвищена шляхом використання двох каналів по 40 МГц, навіть за умови відсутності їхньої ортогональності. Відтак, мережеві адміністратори можуть ухвалювати рішення щодо мовлення в каналах 40 МГц, попри можливі інтерференції з сусідніми мережами, або ж застосовувати агрегацію каналів за умови мінімального навантаження на суміжні мережі. Основною метою дослідження є встановлення впливу агрегації каналів на рівень справедливості розподілу ресурсів у мережі.

Результати численних досліджень підтверджують, що станції (STA), які отримують доступ до ресурсів каналу, демонструють значно вищу пропускну здатність порівняно з іншими. Об'єднання каналів (channel bonding) забезпечує

суттєві переваги як для окремих станцій, так і для мережі в цілому.

Використання об'єднання каналів точками доступу сприяє підвищенню ефективності роботи станцій. У зв'язку з цим, у подальших розробках планується делегування повноважень щодо прийняття рішень безпосередньо станціям, а отже - кінцевим користувачам. Впровадження такого клієнтоорієнтованого підходу сприятиме досягненню більшої справедливості при розподілі ресурсів, що відповідає критеріям, викладеним у джерелах [16-18]. Загалом розглядається п'ять параметрів та 10 варіантів їх реалізації.

Застосування технології об'єднання каналів дозволяє значно розширити діапазон пропускну здатності. Зокрема, при активованому об'єднанні каналів швидкість передачі даних для STA може досягати 135 Мбіт/с, тоді як без нього цей показник обмежений 65 Мбіт/с. Варто враховувати, що це може призвести до збільшення розриву в продуктивності між різними станціями.

Порівняльний аналіз демонструє, що використання двох каналів по 40 МГц у США забезпечує вищий рівень рівноправності та неупередженості доступу, ніж реалізація в ЄС, де доступний лише один канал. Таким чином, об'єднання каналів є ефективним інструментом оптимізації мережі, що потребує зваженого підходу для мінімізації диспропорцій між клієнтськими пристроями.

У даному дослідженні використано методологію, що базується на теорії графів. Вплив перешкод від сусідніх каналів, який є суттєвим у щільних мережах Wi-Fi, ускладнює відтворення результатів за допомогою симуляторів дискретних подій. За винятком пристроїв, що належать до того самого кластера, що й пристрій i , усі мережеві вузли, які приймають сигнал від пристрою i , як правило, зазнають впливу перешкод. Під кластером розуміється сукупність усіх станцій (STA), асоційованих з певною точкою доступу (AP). Припускається, що потужність сигналу перешкод, що надходить від пристрою j до пристрою i , є сталою.

Вибір каналу Wi-Fi залишається одним із найбільш складних завдань у керуванні мережею. Розподіл каналів у різноманітних Wi-Fi середовищах докладно проаналізовано у працях [19-20]. Застосована асинхронна техніка змінює послідовність, у якій кожна точка доступу здійснює сканування оточення. Оскільки користувачі під час налаштування обладнання зазвичай надають перевагу автоматичному вибору каналу, у дослідженні враховано використання виключно ортогональних каналів, які, згідно з даними [21-23], не

створюють взаємних перешкод під час передачі даних. Окремо розглянуто сценарій взаємодії двох найбільш віддалених каналів у спектрі.

На рисунку 3.4 продемонстровано, що точки доступу, які створюють перешкоди (позначені синім кольором), використовують канали, відмінні від тих, що залучені у цільовій SR-WLAN. Запропонований метод базується на фізичних та концептуальних графах конфліктів, сформованих на основі розподілу каналів між декількома WLAN. Пріоритет надається розміщенню точок доступу в зонах з високою інтенсивністю трафіку та високим рівнем конфліктів розміщення [24]. Наприклад, для SR-WLAN з шириною смуги W МГц, що функціонує в оточенні стандартних WLAN (що використовують вищу потужність сигналу) [25], критично важливою є здатність виявляти вільний базовий канал.

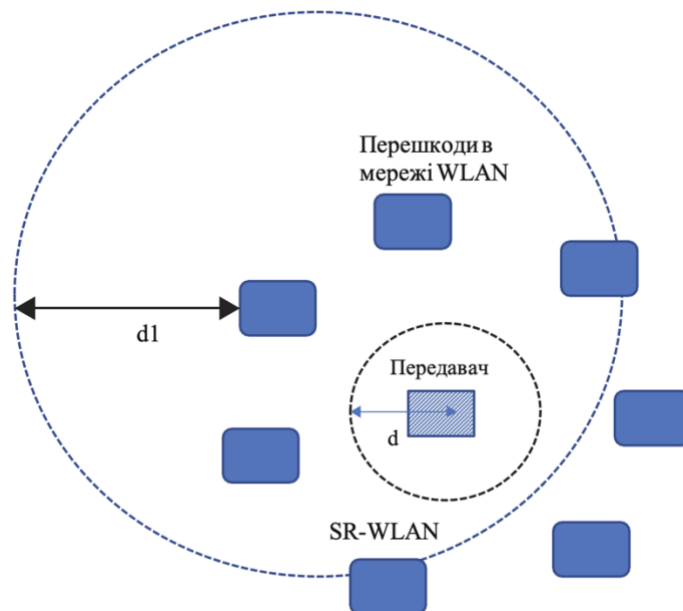


Рисунок 3.4 - Точки доступу, що створюють перешкоди (сині), використовують інший канал, ніж цільова SR-WLAN (штрихований квадрат)

Переваги (підвищення швидкості передачі даних) та недоліки (збільшення показників помилок пакетів) агрегації каналів піддаються аналітичному оцінюванню. У базовому сценарії, за відсутності зовнішніх перешкод та за умови вільного стану основного каналу, пакети у цільовій WLAN доступні постійно, оскільки конфлікти на каналі цільової SR-основної WLAN відсутні. У роботі застосовано фундаментальні теоретико-графові визначення, зокрема коефіцієнт максимальної незалежної множини (MIR).

Згідно з отриманими даними, для MIR вершини характерні корисне навантаження 1400 байт та захисний інтервал 3200 нс. Розрахунок параметру Bn для кожної точки доступу здійснюється за допомогою симулятора мереж дискретних подій NS-3 [26].

Алгоритм визначення пропускної здатності каналу:

1. Побудова графа конфліктів для N вузлів із урахуванням порогу вичерпання ресурсів.
2. Визначення та призначення ширини каналу (w).
3. Обчислення MIR ($n, w(v)$), де $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ та $N = 4 : 12 : k \mid Cw$. За умови $ST > 0$, повернути пару (w, v).
4. Фінальні параметри: цільове значення - 15, результат виконання - 16 (w, v).

В алгоритмі розподілу ширини каналу значні обсяги даних можуть спричинити системні збої за умови, що точки доступу (AP) перебувають у стані дефіциту ресурсів. У таких випадках валідні призначення каналів можуть відхилятися, а точки доступу, що потребують передачі даних, - ігноруватися або отримувати некоректні параметри каналів. В алгоритмі розглядається мережа WLAN із чотирма точками доступу та пороговим значенням дефіциту 5 Мбіт/с. Оскільки доступний лише один канал 160 МГц, значення $C_{160} = 1$. Показник MIR (3, 160 (a, a, a)) = 0 вказує на те, що прогнозована пропускна здатність для третьої точки доступу дорівнює 0. Отже, алгоритм відхиляє ширину каналу 160 МГц через те, що значення ST перевищує 0.

3.4 Отримані результати та оцінка продуктивності

Значення показника MIR, представлені на рис. 3.4, отримані шляхом підключення чотирьох точок доступу (AP) тестової мережі до єдиного каналу шириною 160 МГц. Встановлено наступні значення: MIR (4, 160 (a, a, a)) = 1, а також MIR (1, 160a), MIR (3, 160a) та MIR (3, 160 (a, a, a), 0).

MIR безпосередньо впливає на фактичну пропускну здатність вузла. У моделі з 52 фізично конфліктуючими точками доступу (діапазон 10-25 AP) зі ступенем зв'язку 2, для аналізу застосовується лінійна регресія, де ширина каналу (B) визначається як $B = 0,1MIR$.

Показник MIR було розроблено для максимізації кількості одночасних трансляцій у бездротових мережах (WLAN). На рис. 3.5 продемонстровано

залежність пропускної здатності точки доступу від ширини каналу в діапазоні 20-160 МГц та встановлено кореляційний зв'язок між MIR та Bn (показники для 40 та 80 МГц є порівнянними). Це дозволяє розраховувати MIR для кожної AP та прогнозувати її очікувану пропускну здатність. Визначення вершин здійснюється за допомогою алгоритму Брона–Кербоша [19]. Слід зазначити, що точки доступу з вищим показником MIR демонструють інтенсивніший обмін даними, що призводить до підвищення пропускної здатності. Водночас розрахунок пропускної здатності при $MIR = 0$ або 1 є недостатньо репрезентативним. На рис. 3.5 відображено пропускну здатність SR-WLAN залежно від розташування основного каналу (k), де крива для 20 МГц вказує на відсутність агрегації каналів.

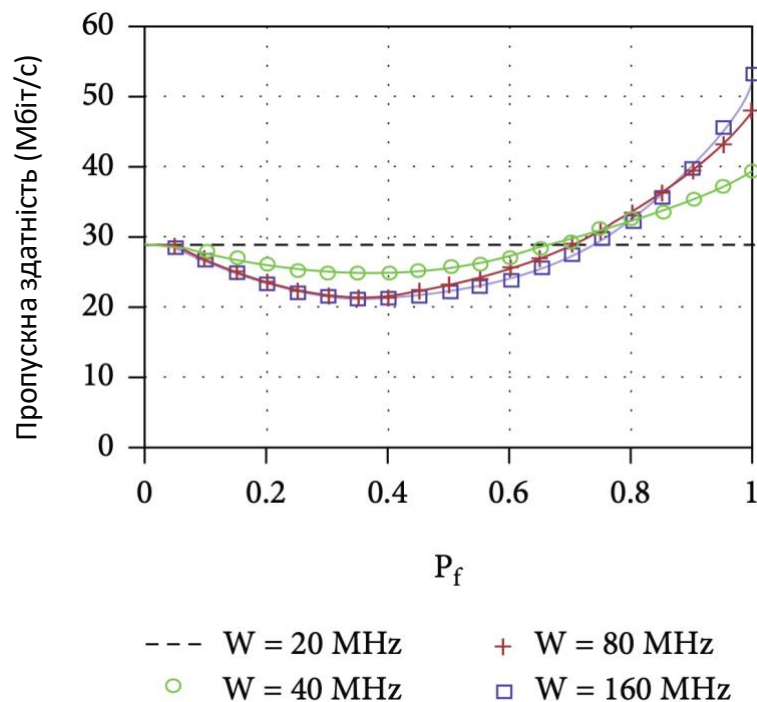


Рисунок 3.5 - Пропускна здатність WLAN у порівнянні з розташуванням основного каналу k

Навіть при встановлених високих рівнях MIR результати моделювання свідчать, що в умовах перевантаження всіх точок доступу (AP) виникає потреба у виявленні схеми розподілу каналів, яка потребує постійного доступу до середовища передачі. Як зазначалося, збільшення ширини каналу сприяє зростанню середньої пропускної здатності точок доступу WLAN, тоді як вузьчі канали зменшують рівень навантаження. Процес ітеративної перевірки всіх

можливих варіантів ширини каналу розпочинається з показника 160 МГц. Застосовуючи метод табу-пошуку, ми генеруємо k -кодування для фізичного графа конфліктів для кожного значення ширини каналу. Загалом, табу-пошук дозволяє визначити такий розподіл каналів, що мінімізує кількість ребер у логічному графі конфліктів. Показники MIR та фактична пропускна здатність кожної точки доступу розраховуються за допомогою моделі лінійної регресії, що дозволяє ідентифікувати кількість «голодних» точок доступу (ST). Якщо значення ST перевищує 0, використовується половина доступних каналів. Після фарбування графа проводиться розрахунок MIR точок доступу та метрики ST , після чого, у разі наявності «голодних» точок, ширина каналу зменшується вдвічі. Процес завершується, коли «голодні» точки доступу відсутні або досягнуто граничного значення ширини каналу. Алгоритм демонструє псевдокод для реалізації запропонованого рішення.

Зазначений підхід забезпечує відповідні результати при ширині каналу $w=80$ МГц. Обчислювальна складність запропонованого рішення суттєво залежить від обраної методології. Для проведення розрахунків застосовано алгоритм Брона–Кербоша [19]. Враховуючи нижчий рівень складності інших етапів технічної реалізації, загальна оцінка складності становить $O(3N)$. Крім того, можливе застосування альтернативних цільових функцій, зокрема спрямованих на мінімізацію кількості ребер у графі логічних конфліктів. Дана конфігурація, у поєднанні з механізмом налаштування порогу очікування (starvation threshold), забезпечує високу адаптивність до різноманітних вимог щодо продуктивності WLAN. Оцінка пропускної здатності здійснювалася за допомогою симулятора NS-3, результати якої відображено на рис. 3.6 при фіксованому розмірі корисного навантаження 1500 байтів. Пропускна здатність було проаналізовано для кожного індексу схеми модуляції та кодування (від MCS0 до MCS10).

На рис. 3.7 відображено залежність пропускної здатності від відстані для стандарту HT MCS0 (BPSK 1/2) при застосуванні методів агрегації кадрів, об'єднання каналів та комбінованої агрегації з об'єднанням каналів. Аналіз графічних даних свідчить про те, що метод об'єднання каналів забезпечує вищу ефективність порівняно з альтернативними методами. Зокрема, на дистанції 50 метрів пропускна здатність для об'єднання каналів становить 12,09 Мбіт/с, для агрегації кадрів - 6,26 Мбіт/с, а для комбінованого методу - 2,31 Мбіт/с.

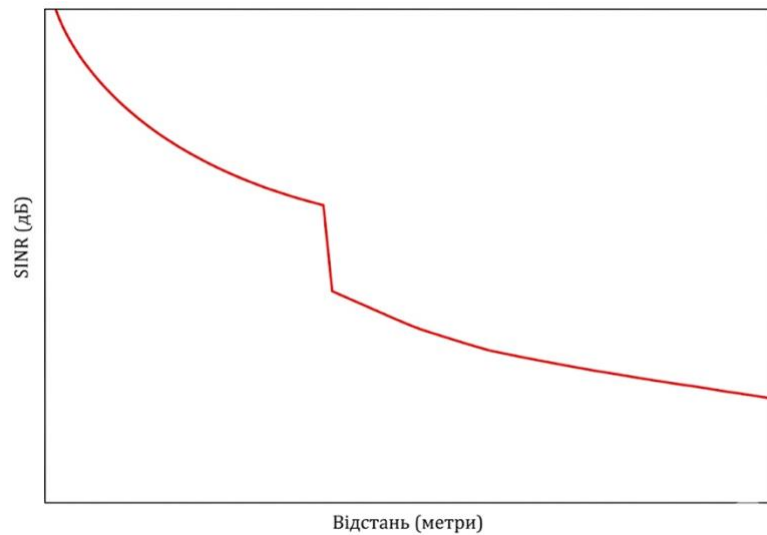


Рисунок 3.6 - Отримані значення SINR у симуляторі NS-3

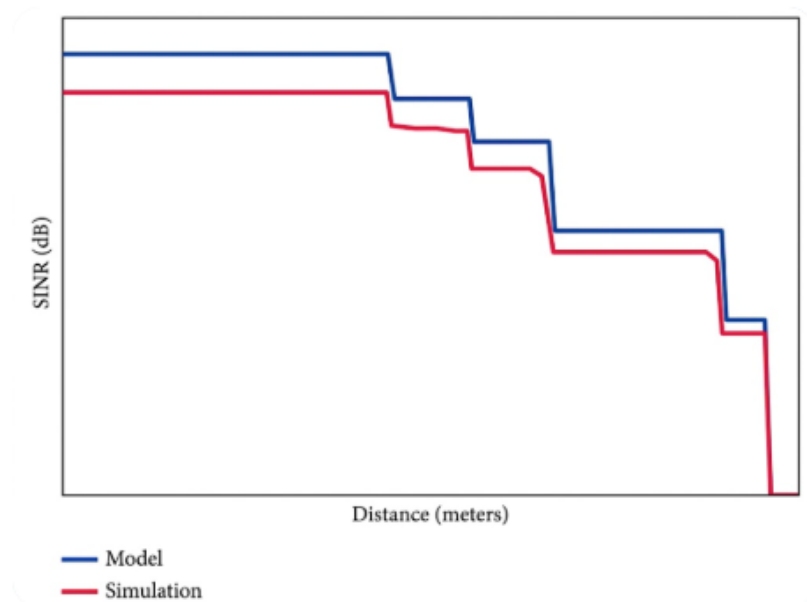


Рисунок 3.7 - Симулятор вимірює результат, тоді як модель надає пропускну здатність фізичного рівня (пропускну здатність рівня додатків)

Дослідження залежності пропускну здатності від відстані для стандарту HT MCS8 (BPSK 1/2) демонструє, що показники ефективності методів агрегації кадрів та комбінованої агрегації зростають зі збільшенням дистанції між пристроями. На відстані 50 метрів швидкість передачі даних при використанні об'єднання каналів досягає 23,55 Мбіт/с, тоді як для агрегації кадрів цей показник становить 3,13 Мбіт/с, а для комбінованої агрегації - 19,27 Мбіт/с.

Для стандарту HT MCS1 (QPSK 1/2) результати також підтверджують перевагу методу об'єднання каналів над іншими досліджуваними методами в

міру збільшення відстані між вузлами. На дистанції 50 м об'єднання каналів забезпечує пропускну здатність 23,87 Мбіт/с, порівняно з 11,91 Мбіт/с для агрегації кадрів та 2,84 Мбіт/с для комбінованої агрегації. Аналогічна тенденція спостерігається і для стандарту HT MCS9 (QPSK 1/2), де метод об'єднання каналів демонструє найвищі показники продуктивності серед розглянутих варіантів.

У представленому випадку технологія об'єднання каналів забезпечує пропускну здатність 47,82 Мбіт/с на відстані 50 м, тоді як для агрегації кадрів цей показник становить 4,04 Мбіт/с, а для агрегації з об'єднанням каналів - 9,82 Мбіт/с. Як відображено на рис. 3.6, отримані значення SINR демонструють збіжність обох кривих, що підтверджує коректність розробленої моделі та результатів, отриманих за допомогою симулятора NS-3. На рис. 3.7 наведено порівняльний аналіз пропускну здатності STA згідно з нашою моделлю та даними симулятора. Встановлено, що об'єднання каналів демонструє вищу ефективність порівняно з агрегацією кадрів та агрегацією з об'єднанням каналів. Зокрема, на дистанції 50 метрів швидкість при використанні об'єднання каналів досягає 23,55 Мбіт/с, тоді як для агрегації кадрів та агрегації ці показники становлять 3,13 Мбіт/с та 19,27 Мбіт/с відповідно.

Згідно з даними табл. 3.1, застосування об'єднання каналів у діапазоні 2,4 ГГц є недоцільним в умовах високого навантаження, оскільки це може призвести до нерівномірного розподілу ресурсів та виникнення розбіжностей.

Впровадження механізмів управління мережею, ілюстроване на рис. 3.8, демонструє підвищення щільності пропускну здатності при агрегації каналів у діапазоні 2,4 ГГц в Європі шляхом використання двох ортогональних каналів шириною 40 МГц. Варто зауважити, що середній показник продуктивності для STA демонструє позитивну динаміку навіть за умов використання агрегації каналів.

Збільшення ширини каналу сприяє підвищенню продуктивності WLAN, проте водночас призводить до зменшення кількості каналів, що не перекриваються. Це може спричинити труднощі при підключенні до мережі у середовищах із високою щільністю користувачів [19–21]. Використання двох ортогональних каналів по 40 МГц оптимізує щільність агрегації в європейському діапазоні 2,4 ГГц, проте їх обмежена взаємосумісність впливає на видимість у системі.

Таблиця 3.1 - Сценарій роботи у діапазоні 2,4 ГГц: розподіл кількості STA, що отримують (+) або втрачають (-) пропускну здатність внаслідок об'єднання двох неортогональних каналів шириною 40 МГц.

η	+	% STA	—	Збільшення (Мбіт/с)	Зменшення (Мбіт/с)
1	37,60	9,60	76,00	31,30	-24,38
2	34,86	8,86	79,61	31,53	-23,50
3	32,94	10,61	79,78	20,11	-23,47
4	29,49	10,36	83,49	20,21	-22,95
5	28,11	22,21	82,11	31,13	-22,67
6	26,94	24,19	82,19	28,60	-22,01
7	17,30	25,47	70,47	28,81	-22,19
8	25,86	24,99	82,49	28,62	-11,56
9	24,67	26,94	81,72	28,42	-21,90
10	<u>23,06</u>	<u>28,51</u>	<u>70,76</u>	<u>28,77</u>	<u>-21,90</u>

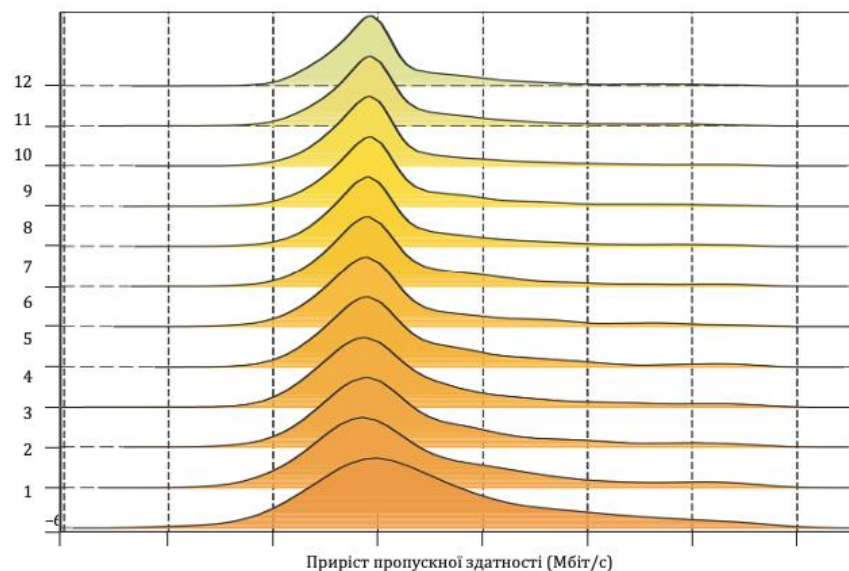


Рисунок 3.8 - Збільшення пропускну здатності каналного з'єднання в європейському діапазоні 2,4 ГГц за рахунок використання двох ортогональних каналів шириною 40 МГц

У стандарті 802.11n граничний розмір кадру становив 65 535 байт. Впровадження специфікацій VHT збільшило максимальний розмір агрегованого кадру (A-MPDU) до 1 048 575 байт (приблизно 1 МБ). Крім того, для PPDU були введені часові обмеження, а максимальна тривалість передачі встановлена на рівні 5,484 мс. У рамках дослідження пропускну здатності залежно від відстані було проведено порівняльний аналіз із використанням

схем модуляції та кодування MCS0 та MCS1, як за наявності агрегації даних, так і без неї.

Агрегація каналів є концепцією, впровадженою в стандарті IEEE 802.11ac для підвищення продуктивності бездротових локальних мереж (WLAN). Збільшення кількості використовуваних каналів сприяє підвищенню швидкості передачі даних та загальної пропускної здатності, що є особливо актуальним для регіонів із доступом до 13 і більше каналів, як-от Європа чи Японія.

Технологія агрегації каналів передбачає об'єднання кількох базових каналів у єдиний широкий канал. Це рішення є критично важливим для мереж SR-WLAN, що забезпечують передачу мультимедійного контенту. Хоча використання смуг пропускання, що перевищують стандартні 20 МГц, підвищує продуктивність Wi-Fi, ефективність такого підходу значно знижується у перевантажених децентралізованих середовищах. У таких умовах альтернативною стратегією є оптимізація координації мережі шляхом вдосконалення централізованих або децентралізованих протоколів.

Аналіз впливу агрегації 11 Wi-Fi-каналів на середню пропускну здатність демонструє ризики порушення принципу рівності доступу, оскільки певні кластери станцій (STA) можуть отримувати диспропорційні переваги. Крім того, при вимкненій функції A-MPDU кілька незалежних трансляцій у вузьких каналах виявляються ефективнішими за одну передачу у широкому каналі. Стандарти 802.11n, 802.11ac та 802.11ah дозволяють формувати канали шириною 40, 80 та 160 МГц (або їх комбінації), проте звуження каналів призводить до зростання рівня інтерференції та кількості конфліктів між точками доступу (AP). Таким чином, виникає завдання пошуку балансу між мінімізацією перешкод та максимальною пропускну здатністю.

Оскільки експериментування з різними мережевими конфігураціями в онлайн-системах та системах машинного навчання є ресурсомістким, актуальним є розроблення стратегій, що оптимізують загальне використання спектру. Варто зазначити, що в стандарті 802.11ac агрегація каналів є неефективною для передачі кадрів малого розміру. Запропонований авторами метод одночасної трансляції на головному та допоміжному каналах демонструє неоднозначні результати: підвищуючи продуктивність, він водночас призводить до надмірного використання спектру в критичних ситуаціях, що є негативним чинником.

Таким чином агрегація з об'єднанням каналів забезпечує вищу пропускну

здатність для MCS2 порівняно з іншими дослідженими сценаріями. Результати експериментів свідчать, що за умов збільшення відстані між передавачем та приймачем використання лише об'єднання каналів для схем з нижчим та вищим рівнями модуляції є ефективнішим, ніж застосування агрегації чи комбінованих методів. Ефективність об'єднання каналів зростає пропорційно до збільшення дистанції між вузлами. У роботі продемонстровано методологію застосування об'єднання каналів у бездротових локальних мережах стандарту 802.11 для оперативного вибору та розподілу смуги пропускання. З метою мінімізації затримок доцільно використовувати єдину ширину каналу для всіх точок доступу WLAN.

Ми пропонуємо масштабовану стратегію, яка нівелює проблеми складності, характерні для традиційних схем розподілу каналів. Завдяки модульній структурі алгоритмів, запропонований підхід гнучко адаптується до різноманітних вимог щодо продуктивності. За допомогою симулятора дискретно-подієвих мереж NS-3 та впровадження стандарту IEEE 802.11ac доведено стійкість запропонованої техніки до мережеских навантажень та високої щільності вузлів. У більшості сценаріїв ефективність рішення перевищує показники стандартних механізмів розподілу ресурсів на 15–20%.

Технологія об'єднання каналів, запроваджена у стандарті IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) у 2010 році, була спрямована на використання ширших смуг частот для підвищення пропускну здатності та вирішення питань справедливості доступу. Стандарт рекомендує перехід від каналів 20 МГц до 40 МГц. Хоча в умовах високих перешкод канал 20 МГц демонструє кращу стабільність, а смуга 40 МГц у перевантажених середовищах є менш надійною, подальші стандарти розвинули цю технологію, додавши підтримку смуг шириною до 160 МГц.

У дослідженні використано графічну модель для візуалізації щільності Wi-Fi мереж та принципів функціонування об'єднання каналів у глобальному масштабі. Виявлені проблеми вказують на необхідність додаткового вивчення динамічних мереж мобільних вузлів та виявлення випадків нерівномірного розподілу ресурсів. Запропоновано механізм перерозподілу ресурсів на основі вагових коефіцієнтів, що дозволяє нівелювати існуючі диспропорції. Подальші дослідження будуть зосереджені на оптимізації стратегій зважування та виборі змінних для ефективного розподілу ресурсів у мережеских структурах.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проаналізовано варіант математичної моделі, керування трафіком в бездротових мережах і розроблена методика проектування бездротових мереж на прикладі освітньої установи. Також досліджено методику об'єднання каналів у технології 802.11ac.

З метою вибору оптимального математичного апарату для моделювання розподілу та управління трафіком у бездротових комп'ютерних мережах проведено аналіз факторів, що спричиняють затримки передачі даних. Обґрунтовано необхідність застосування алгоритмів управління чергами та методів реконфігурації кластерів. Доведено доцільність використання коефіцієнта конкордації як інструмента верифікації для порівняння модельного трафіку з еталонними показниками.

В другому розділі було запропоновано математичну модель управління трафіком у бездротових мережах. Докладно проаналізовано особливості проектування бездротових мереж, призначених для забезпечення навчального процесу у ВНЗ. Організовано роботу групи незалежних експертів з оцінювання техніко-економічних характеристик бездротових мереж, результати якої верифіковано із застосуванням відомих статистичних процедур.

В третьому розділі детально досліджується тема агрегації з об'єднанням каналів, що забезпечує вищу пропускну здатність для 802.11ac. Результати експериментів свідчать, що за умов збільшення відстані між передавачем та приймачем використання лише об'єднання каналів для схем з нижчим та вищим рівнями модуляції є ефективнішим, ніж застосування агрегації чи комбінованих методів. Ефективність об'єднання каналів зростає пропорційно до збільшення дистанції між вузлами. У роботі продемонстровано методологію застосування об'єднання каналів у бездротових локальних мережах стандарту 802.11ac для оперативного вибору та розподілу смуги пропускання. З метою мінімізації затримок доцільно використовувати єдину ширину каналу для всіх точок доступу WLAN.

Запропоновано масштабовану стратегію, яка нівелює проблеми складності, характерні для традиційних схем розподілу каналів. Завдяки модульній структурі алгоритмів, запропонований підхід гнучко адаптується до

різноманітних вимог щодо продуктивності. За допомогою симулятора дискретно-подієвих мереж NS-3 та впровадження стандарту IEEE 802.11ac доведено стійкість запропонованої техніки до мережеских навантажень та високої щільності вузлів. У більшості сценаріїв ефективність рішення перевищує показники стандартних механізмів розподілу ресурсів на 15–20%.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вишневецький, В.М. Широкосмугові бездротові мережі передачі інформації / В.М. Вишневецький, А.І. Ляхов, С.Л. Кравець, І.В. Шахновіч // М.: Техносфера, 2005. - 591с.
2. Gupta, P. Capacity of wireless networks. / P. Gupta and PR Kumar // IEEE Transactions on Information Theory. 2000. - Volume 46, Issue 2.
3. Osseiran, A. The foundation of the mobile and wireless communications system for 2020 and beyond: Challenges, enablers and technology solutions / A. Osseiran, V.Braun, H. Taoka, P. Marsch, H. Schotten, H. Tullberg, MAUusitalo, M.Schellman // Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th. - IEEE, 2013. - С. 1-5.
4. Osseiran, A. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project / A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M.Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, MA Uusitalo, B. Timus and M. Fallgren // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Т. 52. - №. 5. - С. 26-35.
5. Pei, Jie-fu Wireless sensor forest anti-fire network simulation based on NS2 / Pei Jiefu, Gao Lin, and Zhao Yan-dong. // In 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009., 8-11 2009. doi: 10.1109 / ICCSIT.2009.5234944, PP. 300 -303.
6. R. Abdelaal and A. Eltawil, "Scheduling and power adaptation for wireless local area networks with full-duplex capability," Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 29, no. 8, article e3451, 2018.
7. M. Peng, C. Kai, X. Cheng, and Q. Zhou, "Network planning based on interference alignment in density WLANs," IEEE Access, vol. 7, pp. 70525–70534, 2019.
8. S. Bukhari, M. Rehmani, and S. Siraj, "A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 924–948, 2016.
9. H. Hong, Y. Kim, R. Kim, and W. Ahn, "An effective wide-bandwidth channel access in next-generation WLAN-based V2X communications," Applied Sciences, vol. 10, no. 1, p. 222, 2020.

10. D. Bhaskar and B. Mallick, "Performance evaluation of MAC protocol for IEEE 802.11, 802.11Ext. WLAN and IEEE 802.15.4 WPAN using NS-2," *International Journal of Computer Applications*, vol. 119, no. 16, pp. 25–30, 2015.
11. E. Kalantari, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, "Wireless networks with cache-enabled and backhaul-limited aerial base stations," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 11, pp. 7363–7376, 2020.
12. S. Barrachina-Munoz, B. Bellalta, and E. Knightly, "Wi-Fi channel bonding: an all-channel system and experimental study from urban hotspots to a sold-out stadium," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 29, no. 5, pp. 2101–2114, 2021.
13. S. Seytnazarov, D. Jeong, and W. Jeon, "Parallel PPDU transmission mechanism for wideband wireless LANs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 198714–198729, 2020.
14. H. Zhang and L. Dai, "Mobility prediction: a survey on state-of-the-art schemes and future applications," *IEEE access*, vol. 7, pp. 802–822, 2019.
15. S. Barrachina-Munoz, F. Wilhelmi, and B. Bellalta, "Online primary channel selection for dynamic channel bonding in high-density WLANs," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 258–262, 2020.
16. S. Barrachina-Muñoz, F. Wilhelmi, and B. Bellalta, "To overlap or not to overlap: enabling channel bonding in high-density WLANs," *Computer Networks*, vol. 152, pp. 40–53, 2019.
17. J. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre, D. Orden, E. de la Hoz, and T. Ito, "On the goodness of using orthogonal channels in WLAN IEEE 802.11 in realistic scenarios," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 11 pages, 2018.
18. R. Kashyap, "Applications of wireless sensor networks in healthcare," *Wireless Technologies and Telecommunication*, pp. 8–40, 2020.
19. I. Reva, A. Bogdanov, and E. Malakhova, "To the problem of applying Wi-Fi access points for registering motion at the site in the absence of a Wi-Fi module," *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*, vol. 1, pp. 73–78, 2019.
20. Á. López-Raventós and B. Bellalta, "Concurrent decentralized channel allocation and access point selection using multi-armed bandits in multi BSS WLANs," *Computer Networks*, vol. 180, p. 107381, 2020.

21. Y. Son, S. Kim, S. Byeon, and S. Choi, "Symbol timing synchronization for uplink multi-user transmission in IEEE 802.11ax WLAN," *IEEE access*, vol. 6, pp. 72962–72977, 2018.
22. A. Abadleh, "Wi-Fi RSS-based approach for locating the position of indoor Wi-Fi access point," *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 21, no. 4, pp. 69–74, 2019.
23. R. Nair, P. Nair, and V. Dwivedi, "FPGA on cyber-physical systems for the implementation of internet of things," *Advances in Systems Analysis, Software Engineering, and High Performance Computing*, pp. 82–96, 2020.
24. R. Kumar and R. Nair, "Multi-cryptosystem based privacy-preserving public auditing for regenerating code based cloud storage," *International Journal of Computer Applications*, vol. 155, no. 10, pp. 16–21, 2016.
25. P. Sharma and R. Nair, Eds., *FPGA algorithms and applications for the internet of things*, IGI Global, 2020.
26. R. Gupta, K. Almuzaini, R. Pateriya, K. Shah, P. Shukla, and R. Akwafo, "An improved secure key generation using enhanced identity-based encryption for cloud computing in large-scale 5G," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, 14 pages, 2022.
27. P. Pateriya, R. Singhai, and P. Shukla, "Design and implementation of optimum LSD coded signal processing algorithm in the multiple-antenna system for the 5G wireless technology," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, 12 pages, 2022.
28. M. Gupta, V. P. Singh, K. K. Gupta, and P. K. Shukla, "An efficient image encryption technique based on two-level security for internet of things," *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1–21, 2022.
29. R. Shukla, R. Gupta, and R. Kashyap, "A multiphase pre-copy strategy for the virtual machine migration in cloud," *Smart Intelligent Computing and Applications*, vol. 104, pp. 437–446, 2019.
30. X. Fan, S. Li, W. Cui, P. Yang, C. Chen, and G. Huang, "Mixed-numerology channel division for wireless avionics intracommunications," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, 9 pages, 2022.
31. Q. Ni, C. Huang, P. Pardalos, J. Ye, and B. Fu, "Different approximation algorithms for channel scheduling in wireless networks," *Mobile Information Systems*, vol. 2020, pp. 1–13, 2020.