

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління

Кучар Олександр Михайлович

**Метод оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у
внутрішніх приміщеннях на основі аналізу просторових
та радіочастотних параметрів / Method for optimal
placement of Wi-Fi routers in indoor environments based on
the analysis of spatial and radio frequency parameters**

спеціальність: 122 - Комп'ютерні науки
освітньо-професійна програма - Комп'ютерні науки

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи КНм-21
О.М. Кучар

Науковий керівник:
к.т.н., доцент Осолінський О.Р.

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:

«___» _____ 20___ р.

В.о. завідувача кафедри

_____ Н.В. Дзюбановська

ТЕРНОПІЛЬ - 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління
Освітній ступінь «магістр»
спеціальність: 122 – Комп'ютерні науки
освітньо-професійна програма – Комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
Н.М. Васильків
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кучару Олександр Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Метод оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях на основі аналізу просторових та радіочастотних параметрів /
Method for optimal placement of Wi-Fi routers in indoor environments based on the analysis of spatial and radio frequency parameters

керівник роботи к.т.н., доцент Осолінський О.Р.

затверджені наказом по університету від 20 грудня 2024 року № 938.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи 1 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу студента, наукові статті, технічна література.

4. Основні питання, які потрібно розробити

- огляд предметної області;
- дослідити проблеми та існуючі методи оптимізації Wi-Fi покриття;
- проаналізувати радіочастотні моделі та прогнозування покриття;
- вибір перспективного шляху і постановка задачі дослідження;
- розробити загальну модель просторово-радіочастотного аналізу;
- удосконалити метод оптимізації розміщення маршрутизаторів;
- розробити архітектуру програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття;
- розробити модель потоку клієнта;
- провести генерацію RF-heatmaps і розрахунок параметрів покриття;
- розробити оптимізаційний модуль та конфігурацію алгоритму;
- провести експериментальну оцінку результатів

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- загальна архітектура системи.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20 грудня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Затвердження теми кваліфікаційної роботи, ознайомлення з літературними джерелами та складання плану роботи.	до 01.01. 2025 р.	
2	Написання 1 розділу кваліфікаційної роботи	до 01.03. 2025 р.	
3	Написання 2 розділу кваліфікаційної роботи	до 20.05.2025 р.	
4	Написання 3 розділу кваліфікаційної роботи	до 28.10. 2025 р.	
5	Представлення попереднього варіанту кваліфікаційної роботи, перевірка та внесення змін керівником	до 11.11.2025 р.	
6	Опрацювання зауважень та представлення завершеного варіанту кваліфікаційної роботи. Підготовка супроводжуючих документів.	до 25.11.2025 р.	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність тексту.	до 1.12.2025 р.	
8	Оформлення кваліфікаційної роботи та отримання допуску до захисту	до 04.12.2025 р.	
9	Подання кваліфікаційної роботи до захисту на засіданні атестаційної комісії.	до 14.12. 2025 р.	

Студент _____ О. М. Кучар

підпис

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Осолінський О.Р.

підпис

РЕЗЮМЕ

Кваліфікаційна робота на тему «Метод оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях на основі аналізу просторових та радіочастотних параметрів» на здобуття освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» освітньої програми «Комп'ютерні науки» написана обсягом в 84 сторінки і містить 20 ілюстрацій, 3 додатки та 34 використаних джерел.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка моделі оптимального розміщення wi-fi маршрутизаторів яка забезпечує максимальну площу покриття при мінімальній кількості точок доступу з врахуванням просторових обмежень будівлі та характеристик радіопоширення.

Методи досліджень: включають аналіз наукових досліджень існуючих методів оптимізації розміщення активних точок, алгоритмів оптимізації розміщення Wi-Fi маршрутизаторів.

Результати дослідження: розроблено загальну модель просторово-радіочастотного аналізу. На основі спрощеної радіочастотної моделі побудовано карти покриття та карти інтерференції для різних варіантів розміщення маршрутизаторів. Реалізовано метод оптимізації розміщення Wi-Fi маршрутизаторів на основі генетичного алгоритму.

Результати роботи можуть бути використані на етапі проектування або модернізації внутрішніх Wi-Fi мереж у навчальних закладах, офісах та інших будівлях для підвищення якості покриття без істотного збільшення кількості обладнання.

Ключові слова: Wi-Fi, ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ МАРШРУТИЗАТОРІВ, ТОЧКА ДОСТУПУ, ПРОСТОРОВО-РАДІОЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ, RF-МОДЕЛЮВАННЯ, ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ, НЕАТМАР, ЯКІСТЬ ПОКРИТТЯ

ABSTRACT

Qualification thesis titled “Method for optimal placement of Wi-Fi routers in indoor environments based on the analysis of spatial and radio frequency parameters” for obtaining the educational degree “Master” in speciality 122 “Computer Science” within the educational program “Computer Science” consists of 84 pages and includes 20 figures, 3 appendices, and 34 references.

The aim of this qualification work is to develop a model for optimal placement of Wi-Fi routers that ensures the maximum coverage area with a minimum number of access points, taking into account the spatial constraints of the building and radio propagation characteristics.

Research methods include the analysis of scientific studies on existing methods for optimizing the placement of active network points and algorithms for optimization of Wi-Fi router placement.

Research results: a general model of spatial and radio frequency analysis has been developed. Based on a simplified radio frequency model, coverage maps and interference maps for different router placement variants have been constructed. A method for optimization of Wi-Fi router placement based on a genetic algorithm has been implemented.

The results of this work can be used at the design or modernization stage of indoor Wi-Fi networks in educational institutions, offices, and other buildings in order to improve coverage quality without a significant increase in the amount of equipment.

Keywords: Wi-Fi, OPTIMAL ROUTER PLACEMENT, ACCESS POINT, SPATIAL RADIO FREQUENCY ANALYSIS, RF MODELING, GENETIC ALGORITHM, HEATMAP, COVERAGE QUALITY.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз предметної області і постановка задачі дослідження.....	10
1.1 Архітектура внутрішніх Wi-Fi мереж і просторові параметри	10
1.2 Проблеми та існуючі методи оптимізації Wi-Fi покриття.....	11
1.3 Аналіз радіочастотних моделей та прогнозування покриття	14
1.4 Вибір перспективного шляху і постановка задачі дослідження	17
Висновки до розділу 1	19
2 Модель оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів	21
2.1 Загальна модель просторово-радіочастотного аналізу	21
2.2 Пропонований метод до оптимізації розміщення маршрутизаторів.....	25
2.3 Модель оцінки якості покриття та якості обслуговування.....	31
Висновки до розділу 2	34
3 Реалізація моделі оптимального розміщення Wi-Fi мережі	36
3.1 Архітектура програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття.....	36
3.2 Модель потоку клієнта	38
3.3 Генерація Rf-heatmaps і розрахунок параметрів покриття	40
3.4 Розробка оптимізаційного модуля та конфігурації алгоритму	43
3.5 Експериментальна оцінка результатів	49
Висновки до розділу 3	54
Висновки	56
Список використаних джерел	58
Додаток А Загальна архітектура системи.....	61
Додаток Б Код модуля оптимізації.....	62
Додаток В Апробація отриманих результатів	70

ВСТУП

Бездротові локальні мережі стандартів IEEE 802.11 сьогодні є базовою інфраструктурою для доступу до мережі Інтернет у квартирах, офісах, навчальних закладах, торговельних центрах та виробничих приміщеннях. Крім того прослідковується значне зростання кількості мобільних пристроїв, сервісів хмарних обчислень, мультимедійних застосунків та систем відеоконференцій, що призводить до різкого підвищення вимог до якості Wi-Fi покриття. В приміщеннях ці вимоги реалізуються в умовах складного радіочастотного середовища, де на поширення сигналу впливають геометрія простору, будівельні матеріали, інтерференція між точками доступу та нерівномірний розподіл навантаження.

Запровадження сучасних стандартів Wi-Fi 5/6/6E із підтримкою MU-MIMO, OFDMA, широких каналів та механізмів підвищення ефективності у щільних середовищах частково усуває такі проблеми, але завжди є момент коли неправильно спроектоване просторове розміщення точок доступу, що в свою чергу призводить до «мертвих зон», перевантажених сегментів мережі, тому інтуїтивне або емпіричне планування Wi-Fi мережі вже не забезпечує необхідної якості обслуговування. Це зумовлює потребу у формальних моделях просторово-радіочастотного аналізу та інтелектуальних методах оптимізації розміщення маршрутизаторів.

Сучасні підходи до проектування внутрішніх Wi-Fi мереж базуються на поєднанні радіочастотного моделювання, засобів комп'ютерної візуалізації покриття та алгоритмічної оптимізації. Не зважаючи на значну кількість досліджень в цій області, відсутній універсальний інструмент, який би одночасно забезпечував: достатню точність врахування будівельних матеріалів, багатокритеріальну оптимізацію за показниками покриття, інтерференції, кількості активних точок та навантаження. Тому розробка інтегрованої моделі й програмної системи оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів є актуальною науковою та прикладною задачею.

Метою роботи є розробка методу оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях на основі аналізу просторових та радіочастотних параметрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз архітектури внутрішніх Wi-Fi мереж, будівельних конструкцій і радіочастотних факторів, що впливають на якість покриття.
2. Дослідити існуючі підходи до моделювання радіопоширення та оптимізації розміщення точок доступу, виділити їх переваги й обмеження.
3. Побудувати просторово-радіочастотну модель приміщення.
4. Розробити функцію якості, що враховує площу покриття, кількість «мертвих зон» та навантаження на точки доступу.
5. Сформувати механізм на основі еволюційних алгоритмів для пошуку найкращих конфігурацій розміщення маршрутизаторів.
6. Спроектувати архітектуру програмної системи, яка реалізує модулі імпорту плану, RF-моделювання, оптимізацію, оцінку якості, візуалізацію heatmaps.
7. Реалізувати програмний прототип системи оптимізації Wi-Fi покриття та розробити клієнтський інтерфейс для інтерактивної роботи.
8. Провести експериментальні дослідження на тестових планах приміщень, порівняти запропонований підхід з емпіричними та базовими алгоритмічними методами.

Об'єктом дослідження є процес формування внутрішнього Wi-Fi покриття в будівлях з врахуванням геометрії приміщень, будівельних матеріалів та конфігурації мережі.

Предметом дослідження є моделі та методи просторово-радіочастотного аналізу та оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів.

Методи дослідження включають аналіз і систематизацію наукових джерел з радіопоширення та оптимізації Wi-Fi мереж; математичне

моделювання загасання сигналу у внутрішніх приміщеннях; використання еволюційних алгоритмів для оптимізації; комп'ютерне моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в створенні програмної системи, яка дозволяє швидко оцінювати різні варіанти розміщення Wi-Fi маршрутизаторів, обирати конфігурації з найкращим співвідношенням між якістю покриття.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні положення роботи й практичні результати дослідження доповідалися й обговорювалися на VI Міжнародній науковій конференції «Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики» (м. Полтава, Україна) та IX Міжнародній студентській науковій конференції «Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень» (м. Рівне, Україна).

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Архітектура внутрішніх Wi-Fi мереж і просторові параметри

Архітектура внутрішніх Wi-Fi мереж визначається особливостями будівельних конструкцій, топологією приміщення, моделями радіопоширення та технічними характеристиками стандартів IEEE 802.11. В сучасних умовах бездротові мережі використовуються майже повсюди від квартир до великих виробничих приміщень, де геометрія простору суттєво впливає на якість покриття. Крім того внутрішні приміщення створюють складне середовище із значними варіаціями поглинання, відбиття та розсіювання сигналу навіть в межах невеликої площі [1].

Типові будівельні структури мають різні впливи на Wi-Fi сигнал. Наприклад в квартирах сигнал послаблюють несучі та міжкімнатні стіни, в офісних середовищах – скляні перегородки та металеві конструкції.

Характеристики радіопоширення в таких умовах залежать також від частоти: діапазон 2.4 ГГц забезпечує більшу дальність, тоді як 5 ГГц і 6 ГГц (Wi-Fi 6E) схильні до більшого затухання, але мають більшу пропускну здатність та менший рівень інтерференції [2, 3].

Радіохвилі всередині будівель піддаються поглинанню та відбиттям. Матеріали мають різні рівні впливу. Якщо взяти такий матеріал, як бетон то сигнал може ослабитись на 20–35 дБ, цегла — на 10–15 дБ, гіпсокартон — на 3–5 дБ [4]. Дослідження показують, що сучасні матеріали, такі як енергозберігаючі вікна з металізованим напиленням також знижують проникність радіохвиль [5]. Важливим явищем внутрішнього середовища є мультишлях, коли кілька відбитих сигналів досягають приймача з різними фазами, що може спричинити флуктуації RSSI, падіння SNR та нестабільність каналу що дуже відчутно в коридорах [6, 7].

Крім того є велика залежність від стандарту сучасних Wi-Fi мереж — IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) та IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E). Стандарт 802.11ac

використовує MU-MIMO, широкі канали (80–160 МГц) та оптимізований спектральний доступ у діапазоні 5 ГГц [8]. Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6) доповнює ці можливості технологіями OFDMA, BSS Coloring та покращеним просторовим мультиплексуванням, що дозволяє мережам працювати більш ефективно в складних внутрішніх середовищах з високою щільністю клієнтів [9], [10]. Крім того Wi-Fi 6 забезпечує стабільніші показники SNR і меншу варіабельність сигналу складних середовищах, що є перевагою для внутрішніх приміщень [11].

Ще одним фактором є висота, кут та орієнтація точки доступу. Як показано в роботі [12], орієнтація антени визначає форму діаграми спрямованості та вплив на покриття у горизонтальній і вертикальній площинах. Неправильне розташування маршрутизатора може знизити ефективність покриття на 20–40%, тому рекомендують розмішувати точки доступу ближче до центру приміщення і вище рівня людських перешкод для мінімізації поглинання та тіньових зон [13].

З цього виходить, що архітектура внутрішніх Wi-Fi мереж визначається поєднанням просторових параметрів будівлі, матеріалів, топології середовища та особливостей сучасних протоколів IEEE 802.11 і врахування цих факторів є критичним для задачі оптимального розміщення.

1.2 Проблеми та існуючі методи оптимізації Wi-Fi покриття

Сучасні мережі, які використовують стандарти IEEE 802.11ac/ax та діапазони 2.4, 5 і 6 ГГц, проблематика оптимального розміщення маршрутизаторів стає ще актуальнішою через зростання щільності пристроїв і складність внутрішніх радіочастотних середовищ. Дослідження показують, що традиційні підходи до розміщення Wi-Fi точок не забезпечують необхідного рівня ефективності [14].

Однією з ключових проблем є утворення «мертвих зон» (рисунок 1.1), де рівень RSSI падає нижче $-70 \dots -80$ dBm, що робить з'єднання нестабільним або повністю неможливим.



Рисунок 1.1 - Ключові проблеми Wi-Fi покриття

Такі зони утворюються через сильне поглинання сигналу стінами, перекриттями або меблями [15, 16]. Крім того, у щільно населених приміщеннях часто спостерігається ко-канальна та міжканальна інтерференція між кількома точками доступу, що використовують перекривні канали у діапазоні 2.4 ГГц. Це знижує загальну пропускну здатність та призводить до погіршення якості обслуговування користувачів.

Наступною проблемою є неоднорідність навантаження між точками доступу. В реальних сценаріях певні зони будівлі, такі як конференц-зали чи open-space-простори, мають значну кількість одночасно під'єднаних клієнтів. Навіть якщо рівень сигналу там високий, надмірне навантаження викликає конкурентний доступ до середовища, затримки та зниження швидкості. Сучасні стандарти частково вирішують ці проблеми за рахунок OFDMA і MU-

MIMO, однак потреба оптимального просторового розміщення точок всеодно залишається [17].

Ще одна проблема - це орієнтація. В роботі [18], було наголошено, що навіть невелика зміна орієнтації антени може змінити форму діаграми спрямованості, утворюючи зони надмірного підсилення або тіньові області.

Розміщення точки доступу у нішах меблів, на підлозі чи за металевими елементами зменшує ефективну площу покриття та збільшує витрати енергії.

У відповідь на ці проблеми було розроблено низку методів оптимізації Wi-Fi покриття, які можна умовно поділити на три групи: емпіричні методи, моделювальні методи та алгоритмічні методи оптимізації (рисунок 1.2).



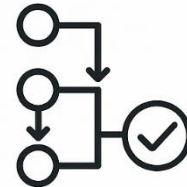
Емпіричні методи

Ручне тестування та побудова карт покриття



Моделювальні методи

Математичні та комп'ютерні моделі



Алгоритмічні методи

Оптимізація через аналітику та штучний інтелект

Рисунок 1.2 - Основні методи оптимізації Wi-Fi покриття

Емпіричні методи передбачають ручне переміщення та тестування точок доступу використовуючи аналізатори спектру, Wi-Fi сканерів або сервісів heatmap. До найпоширеніших інструментів належать NetSpot, Ekahau, iBwave, які дозволяють будувати карти покриття та візуально визначати проблемні місця. Однак такі методи не завжди враховують складну взаємодію хвиль та змінність середовища у часі.

Методи моделювання використовують математичні моделі радіопоширення: one-slope, ITU Indoor, Motley-Keenan, log-distance тощо. Вони дають змогу прогнозувати рівень RSSI на основі плану приміщення та характеристик матеріалів. Останнім часом використовують, гібридні моделі

[19, 20], які поєднують аналіз прямої видимості, мультишляху та дифракції, а також використовують штучний інтелект для точнішого прогнозування сигналу.

Алгоритмічні методи оптимізації є найбільш перспективними. До них належать методи, що формують задачу розміщення точок доступу, як задачу оптимального покриття або багатокритеріальної оптимізації. Для цього використовуються генетичні алгоритми, ройові алгоритми, штучні імунні системи та гібридні алгоритми [21]. Мета таких методів — максимізувати площу покриття, мінімізувати інтерференцію та забезпечити рівномірний розподіл навантаження. В роботі [22] показано, що застосування машинного навчання значно покращує точність прогнозу RSSI та дозволяє оптимізувати розміщення точок доступу навіть у складних приміщеннях.

Тобто можна підсумувати, що сучасні методи оптимізації Wi-Fi покриття спираються на поєднання моделей радіопоширення, комп'ютерного моделювання та інтелектуальних алгоритмів. Вони дозволяють вирішувати комплекс проблем внутрішніх бездротових мереж.

1.3 Аналіз радіочастотних моделей та прогнозування покриття

Реальні будівлі мають складну структуру, неоднорідні матеріали та динамічні умови роботи, точність прогнозування якості сигналу залежить від здатності моделі відтворювати вплив перешкод, затухання, відбиттів та мультишляху. Сучасні дослідження показують, що правильний вибір моделі є критичним для точності прогнозу покриття та коректної роботи оптимізаційних алгоритмів [23, 24].

Однією з базових моделей є Free-Space Path Loss (FSPL), яка описує втрати сигналу у вільному просторі без перешкод. Її використовують, як початкову оцінку та як частину складніших моделей. Формула FSPL залежить від частоти та відстані, що робить її корисною для аналізу Wi-Fi у діапазонах 2.4–6 ГГц. Проте у внутрішніх приміщеннях реальні втрати значно вищі через

поглинання матеріалами, тому FSPL рідко застосовується самостійно, а переважно слугує еталонною моделлю для інших методів [25].

Більш кращий результат забезпечує Log-Distance Path Loss Model, яка враховує логарифмічну залежність між втратами та відстанню. Модель вводить параметр показника затухання n , який відображає складність середовища. Тобто правильно підібраний коефіцієнт n суттєво підвищує точність прогнозування RSSI в Wi-Fi мережах [26]. Модель також дозволяє враховувати shadowing — стохастичні зміни сигналу, викликані перешкодами або мультишляхом.

Ще однією широко використовуваною моделлю є ITU Indoor Propagation Model. Вона враховує кількість стін між передавачем і приймачем, їхній тип та частоту сигналу. ITU Indoor забезпечує задовільну точність для офісів, лікарень та комерційних будівель, де приміщення поділені перегородками різної товщини. Згідно з [27], ця модель є однією з найточніших для оцінки затухання сигналу у Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6 мережах, хоча її точність знижується в середовищах з сильно вираженим мультишляхом.

В сучасних роботах активно застосовуються гібридні моделі (Hybrid RF Models), які поєднують елементи традиційних моделей з машинним навчанням або трасуванням променів (ray tracing). Такі моделі здатні враховувати дифракцію, відбиття від стін та меблів, а також складні геометричні структури. У роботі [28] продемонстровано, що гібридні моделі можуть підвищити точність прогнозування RSSI на 18–30% порівняно з класичними моделями. Використання глибоких нейронних мереж [29], дозволяє адаптувати модель до реальних вимірювань у конкретній будівлі (рисунок 1.3).

Сучасні методи прогнозування покриття також включають ray-tracing моделювання, яке фізично симулює поширення хвиль у просторі. Цей підхід забезпечує найвищу точність, але є обчислювально складним та дорогим. Тому його застосовують коли потрібно оцінювати великі об'єкти, такі як аеропорти або бізнес-центри.



Рисунок 1.3 - Радіочастотні моделі та методи прогнозування покриття

Комерційні інструменти Ekahau та iWave використовують спрощені ray-tracing алгоритми, що дозволяють отримувати дуже точні карти покриття Wi-Fi.

З появою Wi-Fi 6/6E зростає актуальність моделей, здатних враховувати ширші канали, OFDMA, MU-MIMO та використання діапазону 6 ГГц. В роботі [30] представлено, що вищі частоти набагато чутливіші до поглинання та потребують детальнішого моделювання навіть тонких перегородок. Це призвело до активного використання моделей зі змінними параметрами затухання, де коефіцієнти налаштовуються на основі високоточних вимірювань.

Прогнозування покриття також тісно пов'язане з інструментами побудови heatmap-карт, де відображається інтенсивність сигналу у кожній точці приміщення. Heatmaps є кінцевим продуктом радіочастотного моделювання і використовуються для подальшої оптимізації розміщення точок доступу. Останні роботи показують, що комбінування heatmap-аналізу з алгоритмічною оптимізацією забезпечує найкращі результати у складних внутрішніх середовищах [31].

Аналіз радіочастотних моделей показує, що жодна з них не є універсальною. FSPL дає базовий орієнтир, Log-Distance забезпечує гнучкість, ITU Indoor — практичну точність, а гібридні моделі — найвищий рівень відповідності реальності.

1.4 Вибір перспективного шляху і постановка задачі дослідження

Аналіз сучасних наукових праць та технічних звітів показує, що проблема оптимального розміщення точок доступу у внутрішніх приміщеннях переходить від простих емпіричних підходів до математично обґрунтованих методів, які враховують:

- складну радіохвильову модель середовища;
- вплив архітектурних перешкод;
- багатовимірну оптимізацію покриття, перешкод та продуктивності мережі.

В першій групі робіт переважають підходи, що базуються на геопросторовому аналізі та емпіричних моделях поширення. Результати які продемонстровані у цих роботах використовують геостатистичні методи, таких як Kriging, що дозволяє створювати карти покриття та оцінювати якість розміщення точок доступу до фізичного встановлення. Це показує, що емпіричні моделі здатні забезпечити точність, яка буде достатня для первинної оптимізації. Однак вони все ще обмежені тим, що не враховують складних хвильових ефектів.

В другій групі робіт використовувались методи математичного програмування, зокрема змішано-цілочисельна оптимізація та моделі двофазного вирішення. В загальному в цих дослідженнях було запропоновано комплексний підхід, де на першому етапі проводиться високоточне моделювання радіохвильового поля методом, а на другому проводиться оптимізація розміщення точок доступу і каналів за допомогою Binary Linear Programming (BLP). Цей підхід показує значну точність і дозволяє враховувати реальні властивості приміщення, проте є ресурсоємним і потребує великих обчислювальних потужностей, що ускладнює його застосування для типових будівель малого та середнього розміру

Третій напрям представляє застосування алгоритмічних методів оптимізації, які включають генетичні алгоритми, градієнтні методи та grid-

based покриття. Останні дослідження в цьому напрямку показують ефективність grid-based алгоритмів для зменшення кількості точок доступу при одночасному забезпеченні стабільного SNR у всіх зонах. Їхній підхід дозволяє враховувати просторово неоднорідне навантаження та мінімізує кількість активних точок при гарантованому QoS, але не враховує складних RF-ефектів і спрощує структуру приміщення до дискретної сітки, що знижує точність у складних архітектурних конфігураціях

Порівняння попередніх сучасних підходів дозволяє сформулювати такі висновки:

- Емпіричні моделі швидкі, але неточні для сценаріїв із великою кількістю стін та коридорних систем.
- Методи точного моделювання мають найвищу точність, але потребують значних обчислень.
- Оптимізаційні алгоритми працюють ефективно, проте точність залежить від моделі сигналу, яку вони використовують як вхідні дані.
- У жодній роботі не запропоновано універсального підходу, що поєднує точність фізичного моделювання і практичність алгоритмічної оптимізації для реальних будівель.

Тому пропонується модель, яка поєднує:

- полегшену радіочастотну модель, що враховує матеріали стін і мультишлях;
- алгоритм оптимізації на основі багатокритеріального підходу (покриття, мінімізація активних точок, мінімізація перешкод);
- просторову discretization-модель, узгоджену з реальною архітектурою будівлі;
- модуль перевірки прогнозу покриття, заснований на RF heatmap моделюванні.

Метою роботи є розробка методу оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях, що забезпечує максимальну

площу покриття при мінімальній кількості точок доступу з врахуванням просторових обмежень та характеристик радіопоширення.

Основні задачі:

- побудувати загальну модель просторово-радіочастотного аналізу
- розробити метод оптимізації розміщення маршрутизаторів;
- розробити оптимізаційний механізм вибору AP (розміщення, потужність, канал);
- розробити модель оцінки якості покриття та якості обслуговування;
- розробити архітектуру програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття;
- розробити оптимізаційний модуль та конфігурації алгоритму;
- провести експериментальну оцінку результатів

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз архітектури внутрішніх Wi-Fi мереж, де показано, що просторові параметри будівлі та будівельні матеріали суттєво впливають на радіопоширення сигналу. Поглинання, відбиття, дифракція та мультишлях формують складну, просторово неоднорідну картину покриття, що унеможливорює ефективне планування мережі лише на основі інтуїтивних або спрощених моделей.

2. Показано, що сучасні стандарти IEEE 802.11ac/ax (Wi-Fi 5/6/6E) з технологіями MU-MIMO, OFDMA, BSS Coloring та розширеними каналами підвищують спектральну ефективність і дозволяють краще працювати в умовах високої щільності клієнтів. Водночас зростання частоти до 5–6 ГГц призводить до більшого затухання і підвищеної чутливості до перешкод, тож навіть за наявності «просунутого» протоколу розміщення точок доступу залишається критичним фактором якості обслуговування користувачів.

3. Систематизовано основні проблеми внутрішнього Wi-Fi покриття: виникнення «мертвих зон», нерівномірний розподіл навантаження між

точками доступу, а також вплив неправильної висоти та орієнтації маршрутизаторів. Показано, що ці фактори в комплексі знижують стабільність з'єднання, реальну пропускну здатність і призводять до деградації QoS навіть при формально достатньому рівні RSSI.

4. Проаналізовано три основні групи існуючих методів оптимізації Wi-Fi покриття та алгоритмічні. Виявлено, що ізольоване застосування кожної групи не забезпечує одночасно достатньої точності моделювання і практичної придатності для реальних будівель.

5. Розглянуто радіочастотні моделі та методи прогнозування покриття. Показано, що базові моделі (FSPL, log-distance) дають лише наближену оцінку, ITU Indoor забезпечує кращу точність для типових офісних середовищ, а гібридні та ray-tracing підходи дозволяють досягати найвищої відповідності реальним вимірюванням, але є обчислювально дорогими.

6. На основі порівняння сучасних підходів виявлено, що відсутній метод, який одночасно враховує точність фізичного моделювання, обмежені обчислювальні ресурси та потребу оптимізації.

2 МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ Wi-Fi МАРШРУТИЗАТОРІВ

2.1 Загальна модель просторово-радіочастотного аналізу

При розміщенні Wi-Fi маршрутизаторів на першому етапі є створення такого цифрового представлення приміщення, яке дозволяє поєднати його реальну архітектуру з радіочастотними характеристиками. Для цього план будівлі, який зазвичай існує у вигляді креслення або PDF-файлу, перетворюється у цифрову карту. По суті, це двовимірна матриця, де кожна комірка відповідає певній частині приміщення. Саме ця матриця стає основою для подальшого моделювання сигналу. Її можна представити, як детальний макет кімнати або поверху, розділений на маленькі квадрати, у кожному з яких можна оцінити, як поводитиметься Wi-Fi сигнал.

Коли план приміщення перетворено на цифрову карту, виникає потреба описати всі перешкоди, які зустрічаються на шляху сигналу. В реальному середовищі Wi-Fi зіштовхується з різними типами стін, дверей, меблів, перегородок, і кожен з цих елементів по-своєму впливає на його поширення. Тому цифрова карта доповнюється інформацією про матеріали та товщину стін, їх розташування та властивості. Це дозволяє моделі «розуміти», наскільки сильно буде затухати сигнал у різних частинах будівлі.

Після того, як сформовано повну просторову структуру, починається моделювання самого радіосигналу. На першому етапі, ще до застосування будь-яких алгоритмів оптимізації, необхідно отримати початкове уявлення про те, як поширюватиметься сигнал від маршрутизатора, якщо розмістити його в певних точках.

Для цього використовуються відомі моделі поширення сигналу, такі як модель затухання у вільному просторі (FSPL), логарифмічна модель втрат або модель ITU для внутрішніх приміщень. Ці моделі дозволяють приблизно спрогнозувати, яку силу сигналу буде отримано в кожній комірці матриці залежно від відстані, наявних стін і матеріалів. Таким чином формується теплова карта — RF-heatmap. На ній яскраві кольори показують зони, де

сигнал сильний, а темніші — де він слабшає або навіть зникає. Heatmap є важливим елементом, оскільки вона дозволяє побачити не лише якість покриття, а й розташувати маршрутизатори так, щоб мінімізувати проблемні зони.

В результаті першого етапу формується також карта інтерференції. У будь-якій мережі, де працює не один, а кілька маршрутизаторів, сигнали від різних точок доступу можуть накладатися один на одного. Це особливо актуально у будівлях з великою кількістю кімнат або у відкритих офісах, де користувачі перебувають у полі дії кількох маршрутизаторів. Якщо сигнал двох точок доступу надто сильно перекривається, це призводить до погіршення якості зв'язку, навіть при високому рівні RSSI. Саме тому карта інтерференції показує зони, де маршрутизатори можуть заважати один одному, і де потрібно врахувати це під час оптимізації.

Просторово-радіочастотний аналіз дозволяє перетворити реальне приміщення на набір числових моделей, що точно описують поведінку Wi-Fi сигналу на різних відстанях, при різних матеріалах і в різних конфігураціях. Завдяки цьому стає можливим застосування оптимізаційних алгоритмів, які потребують числової оцінки якості рішень. Прогнозування покриття та визначення інтерференції дозволяють зрозуміти, які ділянки будівлі є проблемними і які з них потребують особливої уваги. Цей етап завершується формуванням двох ключових карт (рисунок 2.1) — карти покриття та карти інтерференції, які надалі використовуються під час вибору оптимального розміщення маршрутизаторів.

В моделі оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів важливо правильно подати будівлю у вигляді цифрової структури, яка дозволяє описати як геометрію приміщення, так і властивості радіохвильового середовища. Для цього початковий план будівлі переводиться у цифрову карту — матрицю з певним кроком дискретизації.

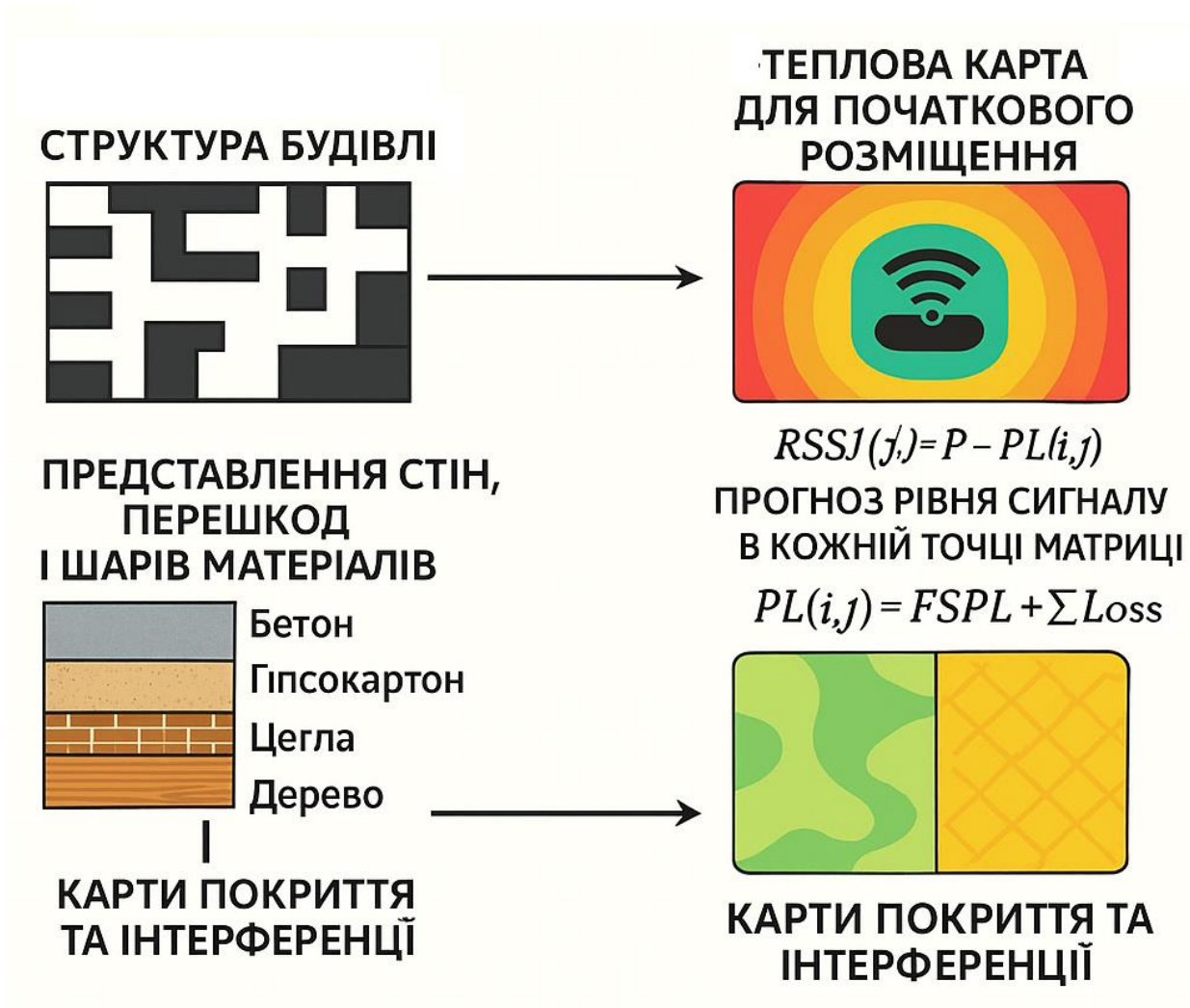


Рисунок 2.1 -Загальна модель просторового та радіочастотного аналізу

Кожна комірка матриці відповідає невеликій ділянці простору, наприклад 0.25 або 0.5 метра, і містить інформацію про те, чи є ця точка вільною, зайнятою стіною, перегородкою або іншим елементом.

Після створення такої карти приміщення проводиться деталізація перешкод. В моделі задаються коефіцієнти загасання для кожного типу стін. Для матеріалу з втратою L_m загальне ослаблення через k стін можна описати як:

$$L_{walls} = \sum_{i=1}^k L_{m_i}, \quad (2.1)$$

Матеріали мають характерні значення затування, тому наявність цих даних дозволяє більш точно розрахувати, як сигнал зменшується при проходженні від точки доступу до будь-якої позиції всередині будівлі.

Наступним кроком є моделювання самого Wi-Fi сигналу. Базова модель, з якої починається будь-який розрахунок, — це модель затування у вільному просторі FSPL:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10_n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (2.2)$$

де, n — коефіцієнт затування середовища залежно від типу будівлі;

X_σ — нормальний шум, що описує мультишлях.

Після обчислення path loss формула рівня сигналу в кожній точці матриці визначається як:

$$RSSI(i, j) = P_t - PL(i, j), \quad (2.3)$$

де, P_t - потужність передавача.

Паралельно формується карта інтерференції. Вона розраховується для кожної точки, де накладаються сигнали різних маршрутизаторів:

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^{N_{AP}} P_k(i, j), \quad (2.4)$$

Тому в кожній точці матриці формується пара значень — рівень основного сигналу та рівень сумарної інтерференції. Це дозволяє визначити також співвідношення сигнал/шум (SNR):

$$SNR(i, j) = RSSI(i, j) - N_0, \quad (2.5)$$

і співвідношення сигнал/інтерференція/шум (SINR):

$$SINR(i, j) = \frac{P_{AP}(i, j)}{I(i, j) + N_0}, \quad (2.6)$$

Після розрахунку всіх показників створюються дві ключові карти: карта покриття та карта інтерференції. Перша демонструє, які ділянки будівлі покриті достатньо сильним сигналом, друга — де кілька точок доступу заважають одна одній. Саме ці карти виступають вхідними даними для алгоритму оптимізації, який у наступному підрозділі буде шукати найкраще розміщення маршрутизаторів.

2.2 Пропонований метод до оптимізації розміщення маршрутизаторів

Пропонується метод, який враховує просторову структуру будівлі, матеріали стін, рівень загасання сигналу, можливі точки встановлення маршрутизаторів і необхідну якість обслуговування. Основна ідея полягає у використанні алгоритму оптимізації на базі генетичного алгоритму, який перебирає різні варіанти розміщення точок доступу та обчислює їхню ефективність за кількома критеріями.

Першим кроком є представлення просторової конфігурації Wi-Fi мережі у вигляді, який може обробляти оптимізаційний алгоритм. План будівлі перетворюється на рівномірну решітку, де кожна клітинка описує певну точку в просторі. Маршрутизатор може бути розташований лише в допустимих клітинках — наприклад, не на стіні, не в шафі, не за межами службових зон.

Рішення кодується як вектор:

$$X = (x_1, x_2 \dots \dots x_n), \quad (2.7)$$

де кожен x_i — координати або індекс клітинки, в якій встановлено точку доступу.

Якщо потрібно враховувати також канал і потужність, тоді:

$$X = \{(p_i, c_i, t_i)\}, i = 1 \dots n, \quad (2.8)$$

де, p_i — позиція,

c_i — канал,

t_i — рівень потужності.

Після визначення можливих розташувань необхідно розрахувати, як сигнал поширюється всередині приміщення. Використовується логарифмічна модель загасання:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_a, \quad (2.9)$$

де, $PL(d_0)$ — базове загасання на відстані d_0 ;

n — показник середовища (2–6 у приміщеннях);

X_a — додаткові втрати: стіни, меблі, перекриття.

Для матеріалів також вводяться правила:

$$PL_w = \sum_{k=1}^m W_k, \quad (2.10)$$

де, W_k — втрати на стіні конкретного типу.

Тоді підсумковий рівень сигналу буде становити:

$$RSSI = P_{tx} - PL(d) - PL_w, \quad (2.11)$$

Так як потрібно не просто досягти покриття, а забезпечити мінімальну кількість активних точок та мінімізувати інтерференцію, застосовується багатокритеріальний підхід. Основні метрики:

1. Покриття (Coverage)-частка площі, де $RSSI \geq -67$ dBm.

2. Кількість точок доступу-мінімізація кількості AP при збереженні QoS.
3. Інтерференція (Interference)-сумарний вплив кількох AP у кожній точці:

$$I(p) = \sum_{i \neq j} \max(0, RSSI_i(p) + RSSI_j(p)), \quad (2.12)$$

SNR:

$$SNR = RSSI - N_{noise} \quad (2.13)$$

Інтегральна функція якості

$$F(X) = w_1 C(X) - w_2 I(X) - w_3 N_{AP}(X) \quad (2.14)$$

Для кожної конфігурації модуль оцінювання формує:

- карту покриття,
- карту інтерференції,
- середні значення RSSI/SNR,
- процент «мертвих зон».

Значення підставляються у функцію $F(X)$. Чим вище функція, тим краще рішення.

Для цього використовується еволюційний підхід — генетичний алгоритм (GA). Він добре підходить, коли простір рішень великий і важко знайти оптимум аналітично.

Нижче представлено псевдокод який буде реалізовувати алгоритм.

Вхід:

```
FLOORPLAN, MATERIALS, CONFIG (параметри моделі та алгоритму)
MAX_GEN           - максимальна кількість поколінь
POP_SIZE          - розмір популяції
p_c               - ймовірність кросоверу
p_m               - ймовірність мутації
NO_IMPROVE_MAX    - макс. кількість поколінь без покращення
```

Вихід:

X_{best} - найкраще знайдене розміщення AP

1. Ініціалізація:
 - 1.1. POP $\leftarrow \emptyset$
 - 1.2. Для i від 1 до POP_SIZE:
 - $X_i \leftarrow \text{GenerateRandomSolution}(\text{FLOORPLAN})$
 - $\text{FIT}_i \leftarrow \text{FIT}(X_i)$ // розрахунок $F(X)$ з картами покриття та інтерференції
 - Додати (X_i, FIT_i) до POP
 - 1.3. $X_{best} \leftarrow \arg \max \text{FIT}_i$ у POP
 - 1.4. $\text{FIT}_{best} \leftarrow \text{FIT}(X_{best})$
 - 1.5. gen $\leftarrow 0$
 - 1.6. no_improve $\leftarrow 0$
2. Головний цикл:

Поки (gen < MAX_GEN) І (no_improve < NO_IMPROVE_MAX):

 - 2.1. NEW_POP $\leftarrow \emptyset$
 - 2.2. Елітизм (за бажанням):
 - Знайти X_{elite} з POP з найвищим FIT
 - Додати X_{elite} до NEW_POP без змін
 - 2.3. Поки |NEW_POP| < POP_SIZE:
 - 2.3.1. Вибір батьків:
 - Parent1 $\leftarrow \text{Selection}(\text{POP})$ // турнірний або рулетка
 - Parent2 $\leftarrow \text{Selection}(\text{POP})$
 - 2.3.2. Кросовер:
 - rnd_c $\leftarrow \text{Random}(0,1)$
 - Якщо rnd_c < p_c:
 - Child1, Child2 $\leftarrow \text{Crossover}(\text{Parent1}, \text{Parent2})$
 - Інакше:
 - Child1 $\leftarrow \text{Parent1}$ (копія)
 - Child2 $\leftarrow \text{Parent2}$ (копія)
 - 2.3.3. Мутація:
 - rnd_m1 $\leftarrow \text{Random}(0,1)$
 - Якщо rnd_m1 < p_m:
 - Child1 $\leftarrow \text{Mutation}(\text{Child1})$
 - rnd_m2 $\leftarrow \text{Random}(0,1)$
 - Якщо rnd_m2 < p_m:
 - Child2 $\leftarrow \text{Mutation}(\text{Child2})$
 - 2.3.4. Оцінка нащадків:
 - $\text{FIT}_{c1} \leftarrow \text{FIT}(\text{Child1})$
 - $\text{FIT}_{c2} \leftarrow \text{FIT}(\text{Child2})$
 - 2.3.5. Додавання до нової популяції:
 - Додати (Child1, FIT_{c1}) до NEW_POP
 - Якщо |NEW_POP| < POP_SIZE:
 - Додати (Child2, FIT_{c2}) до NEW_POP
 - 2.4. Оновлення популяції:
 - POP $\leftarrow \text{NEW_POP}$
 - 2.5. Оновлення глобально найкращого розв'язку:

```

X_curr_best ← arg max FIT_i у POP
FIT_curr_best ← FIT(X_curr_best)
Якщо FIT_curr_best > FIT_best:
    X_best ← X_curr_best
    FIT_best ← FIT_curr_best
    no_improve ← 0

```

Інакше:

```
no_improve ← no_improve + 1
```

```
2.6. gen ← gen + 1
```

3. Повернути X_{best} як найкраще розміщення активної точки.

В запропонованому алгоритмі основну роль відіграє логіка зупинки та оновлення рішень. Алгоритм не повинен працювати безкінечно, тому вводяться два критерії зупинки, які діють одночасно. Перший критерій пов'язаний із максимальною кількістю поколінь, тобто заздалегідь задається число MAX_GEN , і після досягнення цього значення алгоритм припиняє роботу, навіть якщо певний прогрес ще можливий. Другий критерій контролює, чи продовжує покращуватися найкраще знайдене рішення. Для цього використовується лічильник $no_improve$, який фіксує кількість поколінь поспіль, протягом яких глобально найкраще значення функції пристосованості FIT_best не покращується.

Якщо кількість таких послідовних поколінь перевищує порогове значення $NO_IMPROVE_MAX$, вважається, що алгоритм фактично подальший пошук не дає суттєвого виграшу, тому процес оптимізації можна завершити. Поєднання цих двох умов дозволяє обмежити час обчислень та уникнути довгого «кручення на місці», коли рішення більше не покращуються.

Окремо важливим елементом є механізм, коли з кожного покоління до наступного гарантовано переноситься одна або кілька найкращих особин (рішень). Це означає, що навіть якщо операції кросоверу та мутації випадково погіршать більшість нових конфігурацій, найкраще рішення попереднього покоління не буде втрачено. Для задач планування Wi-Fi мереж це особливо корисно, оскільки добре збалансовані конфігурації розміщення маршрутизаторів потребують великих обчислювальних витрат, і втрата такого

рішення через випадкові оператори була б небажаною. Тому такий підхід забезпечує накопичення «знання» алгоритму про вдалі варіанти розміщення.

Вибір батьків, тобто конфігурацій, з яких будуть формуватися нові рішення, здійснюється за допомогою операції selection. Також доцільно використати турнірний відбір. Його суть полягає в тому, що з поточної популяції випадковим чином обирається невелика група рішень, після чого з цієї групи, як батько обирається той варіант, який має найкраще значення функції якості. Це дозволяє надавати перевагу кращим особинам, але водночас не відкидає повністю слабші, оскільки вони іноді також можуть потрапити до вибірки. В результаті досягається баланс між експлуатацією і дослідженням нових областей простору.

Операції кросоверу та мутації також виконуються не завжди, а з певною ймовірністю. Для кросоверу задається ймовірність p_c . Якщо випадкове число, згенероване для пари батьків, менше цього порогу, то відбувається кросовер, тобто обмін частинами їхніх «генів» (позицій маршрутизаторів), і формуються нові нащадки. Якщо ж число більше, то нащадки просто копіюють батьків без змін. Аналогічно для мутації використовується ймовірність p_m : якщо випадкове число менше p_m , в рішенні виконується невелика випадкова зміна (наприклад, одна з точок доступу переноситься в сусідню допустиму позицію або змінюється канал). Такий підхід дозволяє уникнути надто агресивних випадкових перетворень та зберегти здатність алгоритму виходити з локальних мінімумів за рахунок поодиноких мутацій.

Логіка перевірки покращення реалізується через порівняння поточного найкращого значення функції якості в популяції з глобально найкращим результатом, який був знайдений з початку роботи алгоритму. У кожному поколінні обчислюється FIT_curr_best — максимальне значення $FIT(X)$ серед всіх рішень поточної популяції. Якщо FIT_curr_best перевищує глобальне FIT_best , то вважається, що відбулося покращення, тобто глобально найкраще рішення оновлюється, а лічильник $no_improve$ скидається. Якщо ж FIT_curr_best не кращий за FIT_best , то $no_improve$ збільшується на одиницю.

Таким чином, алгоритм «відстежує», скільки поколінь поспіль він не знаходить нічого кращого, і саме це значення використовується в умовах зупинки, як показник того, що пошук стабілізувався.

2.3 Модель оцінки якості покриття та якості обслуговування

Оцінювання якості покриття є ключовим етапом в процесі оптимізації розміщення Wi-Fi маршрутизаторів [33]. Будь-яка конфігурація точок доступу повинна забезпечувати достатній рівень сигналу, прийнятний рівень інтерференції, стабільні значення SNR/SINR та необхідну пропускну здатність в зонах, де працюють користувачі.

Першим показником, який аналізується, є рівень отриманого сигналу RSSI. Для кожної клітинки дискретизованої карти приміщення він обчислюється за формулою

$$RSSI(i, j) = P_{tx} - PL(i, j), \quad (2.15)$$

де, $PL(i, j)$ – загасання сигналу на шляху до точки (i, j) з врахуванням відстані, стін і матеріалів, P_{tx} – потужність передавача.

Згідно з практичними рекомендаціями для внутрішніх Wi-Fi мереж, значення RSSI не повинно бути гіршим за -67 dBm в зонах, де очікується робота сервісів з значним трафіком такі, як відеозв'язок, передача великих файлів тощо. На основі цього визначається показник охоплення Coverage Rate – частка площі, де рівень сигналу не слабший за пороговий:

$$Coverage = \frac{\text{Кількість точок з } RSSI \geq -67 \text{ dBm}}{\text{Загальна кількість точок}}, \quad (2.16)$$

Другим важливим параметром є співвідношення сигнал/шум SNR, яке показує, наскільки сигнал сильніший за фоновий шум приймача. Для кожної клітинки воно обчислюється як

$$SNR(i,j) = RSSI(i,j) - N_0, \quad (2.17)$$

де N_0 – шумова складова.

Коли SNR падає нижче певного рівня (приблизно 15–20 dB), точка доступу змушена переходити на нижчі схеми модуляції та кодування, що призводить до зниження пропускної здатності.

Третій компонент моделі пов'язаний з інтерференцією між точками доступу. Якщо кілька активних точок працюють на однакових або каналах які перекриваються, виникає накладання сигналів, що погіршує ефективність використання радіочастотного спектру. Сумарну інтерференцію в точці можна описати як

$$I(i,j) = \sum_{k=1}^{N_{AP}} P_k(i,j), \quad (2.18)$$

де $P_k(i,j)$ – внесок k -ї точки доступу в тій самій позиції.

На основі цього визначається співвідношення сигнал/інтерференція/шум SINR:

$$SINR(i,j) = \frac{P_{очн}(i,j)}{I(i,j) + N_0}, \quad (2.19)$$

де $P_{очн}(i,j)$ – потужність сигналу від тієї точки доступу, яка вважається основною для клітинки, наприклад, з максимальним RSSI.

Показник SINR є більш інформативним за SNR, тому що враховує не лише шум, а і завади від сусідніх маршрутизаторів.

На основі SINR для кожної клітинки розраховується максимально можлива теоретична пропускна здатність каналу за формулою:

$$C(i,j) = B \cdot \log_2(1 + SINR(i,j)), \quad (2.20)$$

де, B – ширина каналу (20, 40 або 80 МГц для стандарту IEEE 802.11ac/ax). Цей показник дозволяє оцінити, чи достатня пропускна здатність у певній точці для підтримки типових сервісів користувача.

Окремо у моделі враховується поведінка мережі під навантаженням. Для цього вводиться параметр Load Sensitivity, який оцінює рівень завантаження кожної точки доступу. Він визначається як

$$L_{AP} = \frac{N_{clients}}{C_{AP}}, \quad (2.21)$$

де $N_{clients}$ – кількість активних клієнтів в зоні покриття даної точки доступу;

C_{AP} – її ефективна пропускна здатність, розрахована на основі середніх значень SINR для обслуговуваної області.

Якщо L_{AP} перевищує заданий поріг, наприклад, 0,7–0,8, точка розглядається як потенційно перевантажена, що може призводити до збільшення затримок і падіння швидкості для всіх підключених клієнтів.

Ще одним важливим елементом є поняття гарантованої зони якості обслуговування. Це ділянки приміщення, де рівень SINR та пропускна здатність відповідають вимогам конкретних застосувань. Формально така зона визначається умовою

$$C(i, j) \geq C_{req}, \quad (2.21)$$

де C_{req} – мінімально необхідна пропускна здатність для обраного типу сервісу.

Частка площі, що входить до QoS-зон, є додатковим критерієм якості конфігурації.

Всі локальні показники узагальнюються у вигляді інтегральної функції якості розміщення маршрутизаторів:

$$F(X) = w_1 \cdot \text{Coverage} + w_2 \cdot \overline{SNR} - w_3 \cdot \text{Interference} - w_4 \cdot \text{DeadZones}, \quad (2.22)$$

де SNR – середнє значення SNR по всій площі,
Interference – інтегральний показник інтерференції,
DeadZones – кількість або частка клітинок, де RSSI нижче заданого порогу,

Overload – інтегральна оцінка перевантаження точок доступу.

$w_1...w_5$ – вагові коефіцієнти, які задаються залежно від пріоритетів, таких як максимізація покриття, мінімізація інтерференції та уникнення перевантаження.

Конфігурації мережі, які мають великі «мертві зони», високий рівень інтерференції чи значну кількість перевантажених точок доступу, отримують низькі значення $F(X)$ і відсіюються в процесі роботи оптимізаційного алгоритму. Навпаки, варіанти з високим покриттям, добрим SNR/SINR, невеликою кількістю зон зі слабким сигналом та збалансованим навантаженням демонструють максимальні значення інтегральної метрики і розглядаються як кандидати на оптимальні рішення.

Такий підхід перетворює просторово-радіочастотні характеристики будівлі та поведінку мережі під навантаженням в єдину числову оцінку, яка використовується для порівняння різних варіантів розміщення Wi-Fi маршрутизаторів.

Висновки до розділу 2

1. Сформовано узагальнену просторово-радіочастотну модель внутрішнього середовища, в якій план будівлі подано у вигляді дискретизованої матриці з фіксованим кроком. Для кожної комірки враховано тип простору та задано коефіцієнти загасання для різних матеріалів.

2. На основі класичних радіочастотних моделей побудовано механізм розрахунку рівня сигналу в кожній точці приміщення з врахуванням кількості та типу стін на шляху поширення хвилі. Введено окрему модель втрат на

перешкодах та сформовано формальний апарат для обчислення карт покриття і карт інтерференції, які стають вихідними даними для оптимізації.

3. Запропоновано підхід до кодування конфігурацій Wi-Fi мережі у вигляді вектора рішень, де кожна точка доступу описується позицією, а за потреби — також каналом і потужністю передавання.

4. Розроблено багатокритеріальну функцію якості, яка одночасно враховує покриття, кількість точок доступу, рівень інтерференції, значення SNR/SINR та наявність «мертвих зон».

5. Обґрунтовано використання генетичного алгоритму, що забезпечує ефективний пошук у великому, комбінаторно складному просторі можливих розміщень. Детально описано структуру алгоритму.

6. Сформовано цілісну математичну та алгоритмічну основу для реалізації програмної системи оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ WI-FI МЕРЕЖІ

3.1 Архітектура програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття

Архітектура розробленої програмної системи (рисунок 3.1) побудована так, щоб забезпечити повний цикл аналізу плану приміщення, розрахунку радіочастотних параметрів, проведення оптимізації та представлення результатів в зручній візуальній формі. Система складається з кількох функціональних модулів, кожен з яких відповідає за окрему частину задачі, але всі вони взаємодіють між собою через уніфіковані інтерфейси даних. Такий підхід дає можливість масштабувати систему, замінювати алгоритми моделювання чи оптимізації, а також інтегрувати додаткові технології або датасети без зміни основної логіки роботи.

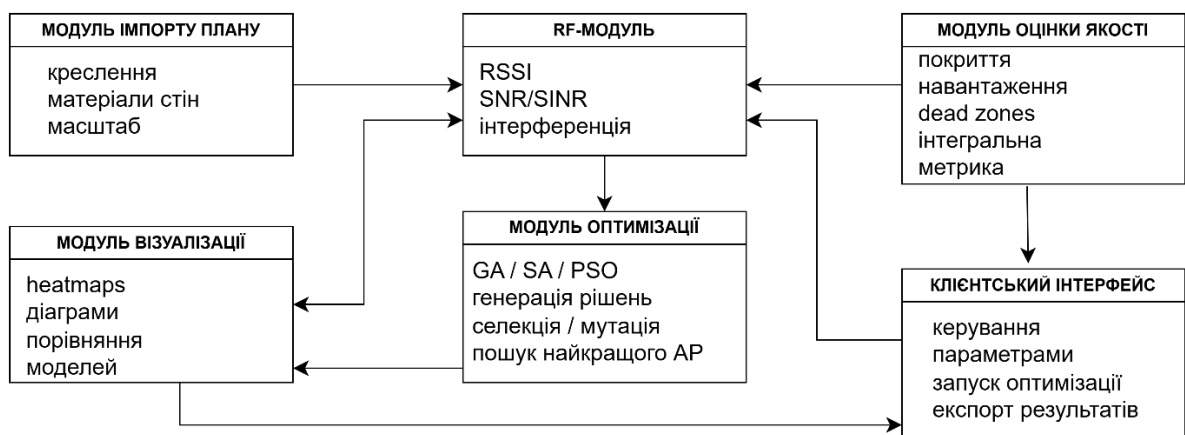


Рисунок 3.1 - Архітектура системи оптимізації Wi-Fi

Першим елементом архітектури є модуль, який забезпечує завантаження планів у форматах PNG, JPG, PDF або SVG. План конвертується у внутрішню цифрову матрицю, де кожен піксель або елемент сітки відповідає певній частині приміщення. Структура будівлі представляється у вигляді багатошарового опису: стіни, двері, перегородки, несучі конструкції, а також матеріали, які впливають на коефіцієнт загасання сигналу. На цьому етапі створюється карта перешкод, що використовується подальшим RF-модулем.

Модуль також дозволяє задавати масштаб приміщення, фізичні параметри матеріалів (бетон, гіпсокартон, скло, метал), а також визначати зони з особливими вимогами до якості покриття, наприклад, аудиторії, конференц-зали, виробничі ділянки або коридори.

Ще одним компонентом системи є модуль радіочастотного моделювання, який відповідає за обчислення RSSI, SNR, SINR, пропускну здатності та рівня інтерференції в кожній точці мапи. Він використовує моделі загасання сигналу, що описані у попередніх розділах, з врахуванням відстані між маршрутизатором і точкою на сітці, направленості антени, кількості та типів стін, перекриття частотного спектра між сусідніми точками доступу.

Модуль здатний швидко обчислювати RF-heatmap для будь-якого набору координат точок доступу. Отримана матриця використовується як основа для подальшої оптимізації.

Проміжне сховище забезпечує зберігання вхідних параметрів приміщення та результати попередніх ітерацій оптимізації, таких як матриці RSSI, SNR, SINR, карти інтерференції, інформацію про навантаження на кожену активну точку. Завдяки цьому система може проводити порівняльний аналіз, будувати гістограми покращення, визначати тенденції збіжності алгоритму, а також виконувати rollback до попереднього рішення, якщо нове виявилось гіршим.

Система також підтримує гарячу заміну параметрів: користувач може змінювати вихідні характеристики антени, потужність передавача, канали або типи матеріалів без повного перезапуску процесу. Це важливо для реальних сценаріїв налаштування мережі, коли зміна лише одного параметра може вплинути на весь розрахунок покриття.

Клієнтський інтерфейс візуалізує дані та дозволяє користувачу запускати оптимізацію, переглядати альтернативні сценарії або експортувати карти покриття у PDF або PNG. Таким чином архітектура системи поєднує обчислювальне ядро та зручний для користувача інтерфейс, що робить її

придатною, як для дослідницьких задач, так і для практичного використання інженерами з мереж.

3.2 Модель потоку клієнта

Модель обробки просторових даних (рисунок 3.2) завантажує план поверху (floorplan), який може бути поданий у різних форматах. На цьому кроці система виконує попередню нормалізацію зображення, встановлює масштаб, визначає контури стін, дверей, вікон та інших елементів. Коли використовується векторний формат, обробка є більш точною, тому що інформація про геометричні об'єкти зберігається у вигляді ліній та полігонів, тоді як при роботі з растровими планами необхідна додаткова обробка, що включає сегментацію та контурне виділення.

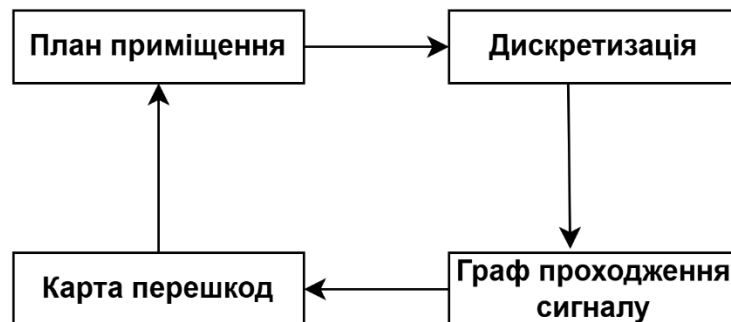


Рисунок 3.2 – Модель обробки простору

Після попереднього аналізу план приміщення перетворюється у дискретну цифрову матрицю (grid), де кожна комірка відповідає певній ділянці фізичного простору, наприклад квадрату 20×20 см. Така пікселізація дає змогу виконувати подальші RF-обчислення у двовимірному полі. На цьому етапі кожній клітині присвоюється атрибут матеріалу, до яких відносяться бетон, цегла, гіпсокартон, скло, дерево або вільний простір. Для цього модуль здійснює аналіз шару стін, перевіряє товщину контурів та використовує довідкові коефіцієнти проникності для різних матеріалів. Для складних

приміщень допускається використання кількох шарів матеріалів, наприклад, стіна, що складається з бетонної основи і гіпсокартонного облицювання. Це необхідно для більш точного визначення затухання сигналу.

Після формування матеріальної карти система переходить до побудови графа проходження сигналу. Приміщення розглядається як зважений граф, де вузли відповідають дискретним точкам простору, а ребра — можливим напрямкам поширення сигналу. Кожному ребру присвоюється вага, що відображає додаткове затухання, спричинене перетином матеріалів та перешкод. Наприклад, перехід через одну бетонну стіну додає близько 12–15 дБ втрат, тоді як через гіпсокартон — лише 3–4 дБ.

Граф дозволяє ефективно моделювати складні траєкторії сигналу, включно з багатократними відбиттями чи проходженням через тонкі перегородки.

Наступним етапом є розрахунок затухання у кожній окремій клітині. Для цього використовується комбінація моделі вільного простору (Free Space Path Loss) та емпіричних поправок для внутрішнього середовища. Затухання в комірці записується у вигляді:

$$PL(i, j) = PL_{FS}(d) + \sum_{k=1}^N \Delta_k, \quad (3.1)$$

де $PL_{FS}(d)$ — затухання у вільному просторі на відстані d ;

Δ_k — внесок кожної з перешкод, які сигнал долає на шляху до стіни або іншої перешкоди.

Модуль також враховує ефекти мультишляху, додаючи статистичну складову до сигналу шляхом моделювання варіацій згідно з логнормальним законом.

Кінцевим результатом є формування карти перешкод (obstacle map), яка в компактній структурі містить повну інформацію про матеріали, товщину, прозорість та вплив кожної ділянки приміщення на проходження радіосигналу. Ця карта служить базою для RF-модуля та використовується при кожному повторному розрахунку покриття під час роботи оптимізаційного алгоритму. Завдяки компактному представленню у вигляді матриці та графа

система може швидко перераховувати heatmap навіть у великих приміщеннях, що значно підвищує продуктивність оптимізації.

Модель обробки простору забезпечує точне та структуроване представлення внутрішнього середовища, дозволяючи враховувати всі ключові фізичні фактори, що впливають на покриття Wi-Fi мережі.

3.3 Генерація RF-heatmaps і розрахунків параметрів покриття

Генерація RF-heatmaps є центральним етапом в процесі аналізу внутрішнього простору та оцінки ефективності розміщення Wi-Fi маршрутизаторів. Теплові карти дозволяють відобразити рівень радіосигналу в кожній точці приміщення та забезпечити основну інформацію для порівняння різних варіантів конфігурацій мережі.

Процес побудови heatmaps (рисунок 3.3) базується на результатах, отриманих у попередньому модулі обробки простору, і включає розрахунок RSSI, Path Loss, SNR та SINR для кожної дискретної комірки цифрової мапи.

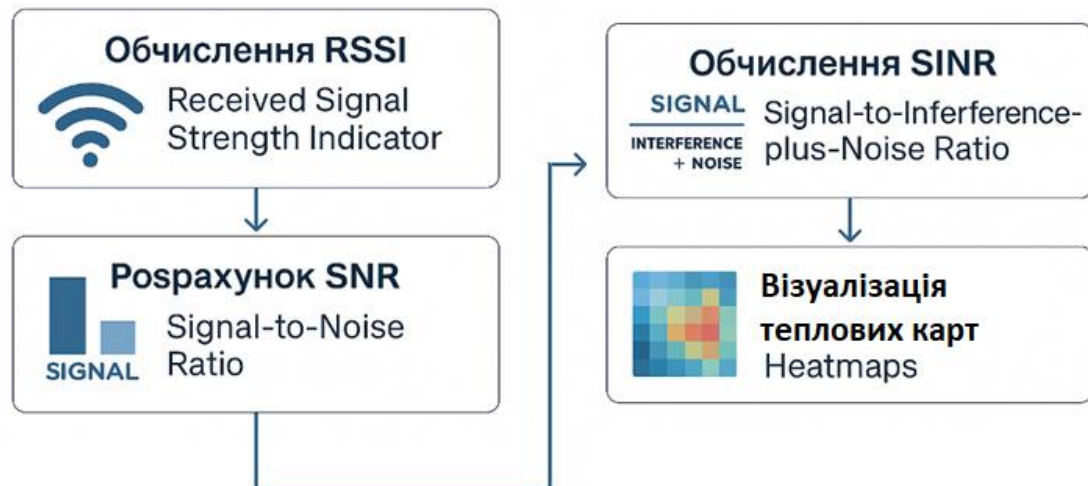


Рисунок 3.3 – Модель обробки простору

На першому етапі відбувається обчислення втрат на шляху сигналу (Path Loss). Для кожної клітинки внутрішнього простору система визначає відстань

до точки доступу, тип матеріалів між точками та кількість перешкод. Модель Path Loss формулюється, як сума затухання у вільному просторі та додаткового внеску від перешкод. Узагальнена формула може бути подана у вигляді:

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log_{10}(d) + \sum_{k=1}^N \Delta_k, \quad (3.2)$$

де PL_0 — затухання на відстані 1 м;

n — коефіцієнт ступеня середовища (для внутрішніх приміщень 2–4);

Δ_k — втрати від кожного перетнутого матеріалу. Така модель дозволяє враховувати реальні умови поширення сигналу, включаючи складні архітектурні форми, коридорні системи та приміщення з неоднорідними матеріалами.

На основі Path Loss обчислюється рівень отриманого сигналу—RSSI. Він визначається як різниця між потужністю передавання маршрутизатора та загасанням:

$$RSSI = P_{tx} - PL(d), \quad (3.3)$$

Далі виконується розрахунок співвідношення сигнал–шум (SNR), яке характеризує якість каналу. Для цього система оцінює спектральну щільність шуму та додає можливий внесок інтерференції від сусідніх точок доступу або інших джерел. Формула для SNR має вигляд:

$$SNR = RSSI - N, \quad (3.4)$$

де N — рівень шуму, що включає термічний шум і зовнішні завади.

Якщо система працює у середовищі з кількома точками доступу, розраховується показник SINR:

$$SNIR = \frac{P_{signal}}{P_{interference} + N}, \quad (3.5)$$

Отримані параметри стають основою для генерації RF-heatmaps. Теплова карта будується як двовимірне поле, у якому кожній клітині відповідає певне значення RSSI або SINR, і це значення візуалізується за допомогою колірної шкали. Теплові карти дозволяють миттєво визначити зони сильного і слабого сигналу, зрозуміти характер поширення радіохвиль у приміщенні та оцінити вплив стін, перегородок і меблів.

Одним з важливих етапів є визначення так званих «мертвих зон». До таких зон належать ділянки, де рівень RSSI є нижчим за допустимий поріг, який у більшості випадків становить близько $-75\dots-80$ дБм для низькоякісного з'єднання та близько -67 дБм для стабільного підключення. Карта мерехтіння сигналу дає змогу автоматично виділити ці ділянки та кількісно оцінити їхню площу. Якщо система виявляє значні області з слабким сигналом, оптимізаційний модуль отримує їх як «зони пріоритетної компенсації», що впливає на формування нових кандидатних конфігурацій AP.

Ще одним важливим аспектом є побудова heatmaps інтерференції. У багатоточкових Wi-Fi мережах, особливо при використанні 2.4 ГГц, перекриття каналів є поширеною проблемою. Тому система обчислює карти інтерференції, де візуально позначає ділянки, у яких декілька AP працюють на близьких частотах, що може призвести до деградації продуктивності. У таких випадках оптимізаційний модуль може не лише змінити координати точок доступу, але й автоматично запропонувати зміну каналів або потужності.

Оскільки оптимізація передбачає багато ітерацій, теплові карти виступають не лише як кінцевий результат, але й як інструмент порівняння різних варіантів розміщення AP. Для кожної конфігурації будується набір heatmaps: RSSI-карта, SINR-карта, карта інтерференції та карта зони гарантованого QoS. Усі вони дозволяють швидко оцінити, чи є нова

конфігурація кращою за попередню. Тому в системі передбачено механізми порівняння «до/після» з автоматичними метриками покращення.

Механізм генерації RF-heatmaps забезпечує інструментальну основу для етапів оптимізації розміщення маршрутизаторів. Завдяки точному обчисленню радіочастотних параметрів і наочній візуалізації теплових карт система може ефективно аналізувати якість покриття та приймати обґрунтовані рішення щодо найкращого розміщення активних точок.

3.4 Розробка оптимізаційного модуля та конфігурації алгоритму

Оптимізаційний модуль є ядром програмної системи, оскільки саме він відповідає за пошук такого розміщення точок доступу, яке забезпечує найкращу якість Wi-Fi покриття за обраними критеріями. Реалізація цього модуля передбачає кілька ключових аспектів: вибір способу кодування рішень (хромосом), налаштування параметрів еволюційного алгоритму, задання просторових обмежень, а також розробку формату конфігураційних файлів, через які вся система отримує вхідні параметри.

У розробленій моделі кожне можливе розміщення Wi-Fi мережі описується хромосомою, що містить інформацію про позиції точок доступу та, за потреби, їх додаткові параметри (канал, потужність, тип антени). Найпростішим варіантом є кодування у вигляді набору координат:

$$X = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}, \quad (3.6)$$

де, n – кількість точок доступу;

(x_i, y_i) – дискретні координати на сітці приміщення.

В реалізації це представлено як масив цілих чисел, де кожна пара індексів відповідає певній клітинці цифрової карти. Для розширеного варіанта, коли потрібно враховувати канал і потужність, хромосома доповнюється:

$$X = \{(x_i, y_i, c_i, p_i)\}, i = 1..n, \quad (3.7)$$

де, c_i – номер каналу;

p_i – рівень потужності.

Таке кодування дозволяє модулю оптимізації не лише переміщувати точки доступу в межах приміщення, а й коригувати їх параметри.

В роботі застосовується генетичний алгоритм, для якого задаються такі основні параметри: розмір популяції, ймовірність кросоверу, ймовірність мутації, максимальна кількість поколінь та критерії зупинки. Розмір популяції визначає, скільки різних конфігурацій одночасно розглядається на кожній ітерації; зазвичай він знаходиться в діапазоні 20–100 особин, залежно від складності приміщення. Занадто мала популяція може призвести до передчасної збіжності, тоді як надто велика — до значного збільшення часу обчислень.

Ймовірність мутації визначає, як часто алгоритм вноситиме випадкові зміни в хромосоми. Для задач просторового розміщення її значення зазвичай обирають у межах 0,01–0,1. Низька ймовірність може зробити пошук надто інертним, тоді як надто велика призведе до хаотичного «блукання» простором рішень. Кількість поколінь та критерій зупинки задаються так, щоб забезпечити баланс між точністю та часом виконання. Наприклад, алгоритм може завершувати роботу, якщо протягом певної кількості поколінь не спостерігається покращення інтегральної метрики $F(X)$ або досягнуто заданий максимум поколінь.

Окремо враховуються просторові обмеження. У хромосомі можуть бути закодовані лише ті позиції, які відповідають доступним для монтажу точкам (стіни, стелі, технічні приміщення). Для цього використовується маска доступності, отримана на етапі обробки плану. Під час генерації нових рішень алгоритм перевіряє, чи не потрапляють координати маршрутизаторів у заборонені області (наприклад, ліфти, шахти, санвузли, зони за межами будівлі). У разі порушення обмеження генерується нова позиція або виконується корекція координат до найближчої допустимої точки.

Оптимізаційний модуль в цій архітектурі відповідає за формування конфігураційних файлів, за допомогою яких система отримує всі необхідні

параметри. Для цього використовується формат JSON, що є зручним завдяки своїй читабельності та простоті інтеграції в сучасні програмні платформи. Типова конфігурація містить кілька логічних блоків. Перший блок описує план приміщення куди входить шлях до файлу креслення, масштаб, товщина стін та розмір дискретизації. Другий блок описує властивості стін та інших матеріалів, тобто для кожного типу матеріалу задаються коефіцієнти загасання, діелектрична проникність та, за потреби, частотні залежності.

Третій блок JSON-конфігурації містить параметри маршрутизаторів, тобто тип стандарту (802.11n/ac/ax), діапазон частот, максимальну потужність передавача, набір допустимих каналів, характеристики антени.

Подана JSON-конфігурація задає всі основні параметри, необхідні для роботи системи оптимізації розміщення Wi-Fi маршрутизаторів. Файл поділено на кілька блоків: `floorplan` (рисунок 3.4), `materials`, `router`, `rf_model` та `optimization`. Кожен з них відповідає певному модулю архітектури, описаному в підрозділах 3.1–3.3.

```
1  "floorplan": {  
2      "file_path": "data/plans/office_floor_1.png",  
3      "scale_m_per_pixel": 0.2,  
4      "grid_step_m": 0.4,  
5      "height_m": 3.0,  
6      "accessible_mask_file": "data/plans/office_floor_1_mask.png"  
7  }
```

Рисунок 3.4 - Блок `floorplan`

Цей блок задає параметри плану приміщення. Поле `file_path` вказує шлях до файлу креслення, який буде імпортовано модулем обробки простору. Параметр `scale_m_per_pixel` визначає масштаб зображення: скільки метрів відповідає одному пікселю на плані.

Це дає змогу правильно перевести координати зображення у фізичні розміри. Значення `grid_step_m` задає крок дискретизації — розмір однієї комірки просторової сітки; у прикладі це 0,4 м, тобто приблизно 40 см. Параметр `height_m` описує висоту приміщення, що може бути використано при

розрахунку тривимірних моделей або оцінці затухання у багатоповерхових будівлях. Нарешті, `accessible_mask_file` містить шлях до маски доступності — окремого зображення, на якому позначені області, де дозволено розміщувати точки доступу, та заборонені зони, наприклад ліфти, шахти, санвузли. Ця маска використовується модулем оптимізації як просторове обмеження (рисунок 3.5).

```

1  "materials": {
2    "concrete_wall": { "loss_db": 12.0, ... },
3    "brick_wall":    { "loss_db": 8.0,  ... },
4    "gypsum_wall":  { "loss_db": 4.0,  ... },
5    "glass":        { "loss_db": 2.0,  ... },
6    "door":         { "loss_db": 1.0,  ... }
7  }

```

Рисунок 3.5 - Блок materials

В цьому блоці описуються основні типи матеріалів, які зустрічаються на плані. Для кожного матеріалу задається параметр `loss_db` — додаткове затухання сигналу (у децибелах), яке додається при проходженні крізь відповідний об'єкт. Наприклад, для бетонної стіни встановлено 12 дБ, для цегляної — 8 дБ, для гіпсокартонної перегородки — 4 дБ, для скла — 2 дБ, для дверей — 1 дБ. Поле `description` містить текстовий опис, який використовується у звітах та інтерфейсі. Ці параметри напряму використовуються RF-модулем під час побудови графа проходження сигналу та обчислення Path Loss (рисунок 3.6).

```

1  "router": {
2    "standard": "IEEE 802.11ac",
3    "tx_power_dbm": 20,
4    "antenna_gain_dbi": 3,
5    "channels": [36, 40, 44, 48],
6    "band_mhz": 5180,
7    "max_ap_count": 6
8  }

```

Рисунок 3.6 - Блок router

Цей блок задає характеристики типового маршрутизатора, який буде використано в моделюванні. Параметр `standard` вказує стандарт Wi-Fi, що впливає на підтримувані ширини каналів і максимальну пропускну здатність. Значення `tx_power_dbm` визначає потужність передавача в дБм, а `antenna_gain_dbi` — коефіцієнт підсилення антени. Масив `channels` задає список дозволених каналів в діапазоні 5 ГГц, а `band_mhz` — центральну частоту або діапазон використання. Параметр `max_ap_count` обмежує максимальну кількість точок доступу, яку оптимізаційний алгоритм може розміщувати в межах будівлі. Усі ці параметри використовуються при генерації початкових рішень і під час оцінки пропускну здатності. В цьому блоці (рисунок 3.7) містяться параметри самої радіочастотної моделі.

```

1  "rf_model": {
2      "pl0_db": 40.0,
3      "path_loss_exponent": 3.0,
4      "noise_floor_dbm": -92.0,
5      "shadowing_sigma_db": 4.0,
6      "min_rssi_dbm": -67.0,
7      "frequency_ghz": 5.2
8  }
```

Рисунок 3.7 - Блок `rf_model`

Значення `pl0_db` — базове затухання на відстані 1 м, `path_loss_exponent` — коефіцієнт ступеня середовища n , який визначає, наскільки швидко слабшає сигнал з відстанню. Параметр `noise_floor_dbm` задає рівень шумового фону; він використовується для розрахунку SNR і SINR. `shadowing_sigma_db` описує стандартне відхилення логнормального затінення (`shadowing`), яке моделює випадкові флуктуації рівня сигналу через мультишлях та локальні особливості середовища. Значення `min_rssi_dbm` визначає поріг прийняттого рівня сигналу (наприклад, -67 дБм для якісного з'єднання), а `frequency_ghz` задає робочу частоту в гігагерцах, що важливо для точного обчислення Free Space Path Loss (рисунок 3.8)

```

1  "optimization": {
2      "algorithm": "GA",
3      "population_size": 40,
4      "max_generations": 120,
5      "crossover_probability": 0.8,
6      "mutation_probability": 0.05,
7      "no_improve_limit": 20,
8      "weights": {
9          "coverage": 0.4,
10         "snr": 0.25,
11         "interference": 0.15,
12         "dead_zones": 0.15,
13         "overload": 0.05
14     }
15 }

```

Рисунок 3.8 - Блок optimization

Цей блок задає параметри оптимізаційного алгоритму. Поле `algorithm` обирає тип алгоритму, де:

- `population_size` — розмір популяції, тобто кількість одночасно розглядуваних конфігурацій;
- `max_generations` задає верхню межу кількості поколінь.

Параметри `crossover_probability` та `mutation_probability` визначають ймовірності виконання кросоверу та мутації відповідно. Значення `no_improve_limit` встановлює кількість поколінь без покращення метрики, після якої алгоритм може достроково зупинитися. Підблок `weights` містить вагові коефіцієнти інтегральної функції якості $F(X)$: найбільшу вагу має покриття (`coverage`), далі — якість сигналу (`snr`), інтерференція (`interference`), наявність мертвих зон (`dead_zones`) та перевантаження точок доступу (`overload`). Зміна цих ваг дозволяє адаптувати критерій оптимізації до пріоритетів конкретного сценарію.

Дана JSON-конфігурація описує, як фізичні властивості середовища, параметри обладнання та налаштування алгоритму, забезпечуючи гнучке переналаштування системи під нові об'єкти або вимоги без необхідності змінювати програмний код.

3.5 Експериментальна оцінка результатів

Програмний комплекс [32] було реалізовано як застосунок на мові Python з використанням бібліотеки Qt (PyQt5). Головне вікно побудовано за схемою класичного QMainWindow з розділенням простору на три основні зони: центральну область для відображення плану приміщення, ліву панель для роботи з просторовою моделлю та праву панель для параметрів оптимізації та виведення результатів (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Головне вікно

В центральній частині вікна розміщено спеціальний компонент FloorplanView, реалізований на основі QGraphicsView та QGraphicsScene. Після завантаження floorplan-зображення (PNG або JPEG) воно додається до сцени, як фоновий шар (рисунок 3.10).

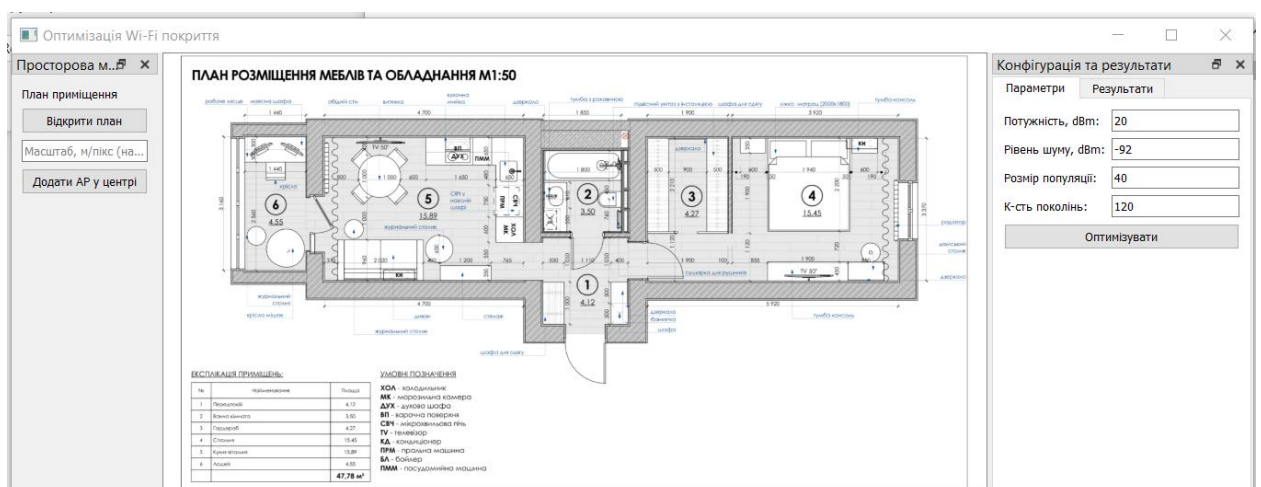


Рисунок 3.10 – Вивід плану будівлі

Поверх цього шару програмно накладаються піктограми точок доступу (AP), які відображаються як графічні елементи з можливістю інтерактивного переміщення мишею (рисунок 3.11).

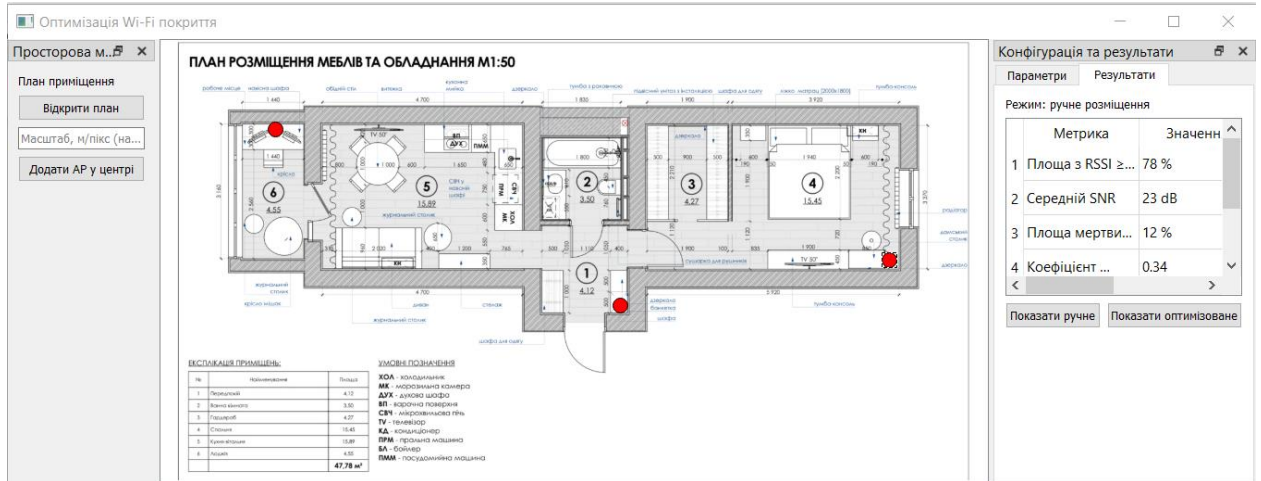


Рисунок 3.11 – Розміщення точок доступу

Координати цих елементів прив'язуються до дискретної сітки, що використовується у розрахунковій моделі: при зміні положення AP у графічному інтерфейсі оновлюється відповідний запис у внутрішньому поданні хромосоми (рисунок 3.12).

```
Select Administrator: Windows PowerShell - python app.p:

(venv) C:\app_dp-PRJ\wifi-optimizer-gui>python app.py
=== Поточна конфігурація AP (ручне розміщення) ===
{
  "mode": "manual",
  "aps": []
}
=== Поточна конфігурація AP (ручне розміщення) ===
{
  "mode": "manual",
  "aps": [
    {
      "x_px": 107.5,
      "y_px": 94.5
    },
    {
      "x_px": 480.5,
      "y_px": 284.5
    },
    {
      "x_px": 771.5,
      "y_px": 235.5
    }
  ]
}
=== Поточна конфігурація AP (ручне розміщення) ===
{
  "mode": "manual",
  "aps": [
    {
      "x_px": 107.5,
      "y_px": 94.5
    },
    {
      "x_px": 480.5,
      "y_px": 284.5
    },
    {
      "x_px": 771.5,
      "y_px": 235.5
    }
  ]
}
=====
```

Рисунок 3.12 – Координати точок

Ліва панель реалізована, як QDockWidget, в якій розміщено блок «План приміщення». Вона містить елементи керування для завантаження нового плану (кнопка «Відкрити план»), поле для задання масштабу в метрах на піксель та комбіновані елементи для перегляду карти матеріалів. Додатково передбачено перемикач режимів: показати базовий план, карту матеріалів, карту доступних зон для розміщення активних точок. Всі ці режими реалізовані як різні графічні шари поверх однієї сцени QGraphicsScene.

Права панель також реалізована у вигляді QDockWidget і поділена на дві вкладки: «Параметри» та «Результати» (рисунок 3.13). На вкладці «Параметри» розміщено форму, що відповідає JSON-конфігурації де розміщені поля для введення потужності передавача, вибору стандарту Wi-Fi, діапазону каналів, кількості точок доступу, параметрів радіомоделі та налаштувань генетичного алгоритму (розмір популяції, кількість поколінь, ймовірності кросоверу та мутації). Значення цих параметрів зчитуються та зберігаються у внутрішню структуру конфігурації, а також можуть бути експортовані/імпортовані у JSON-файл.

На вкладці «Результати» відображаються чисельні показники для поточної конфігурації мережі.

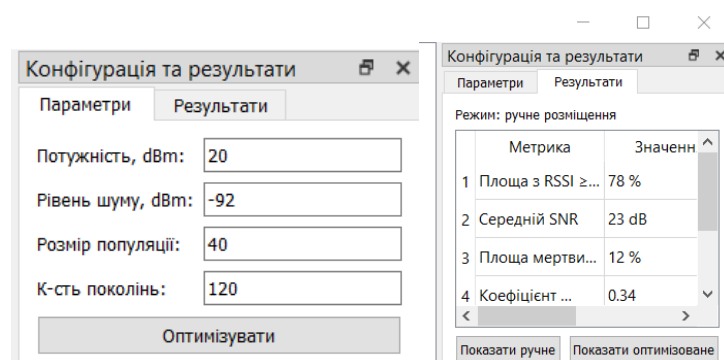


Рисунок 3.13 – Координати точок

Вона містить таблицю з метриками: відсоток площі з $\text{RSSI} \geq -67$ dBm, середній SNR, площа «мертвих зон», інтегральний показник інтерференції, розрахункова пропускна здатність в ключових тестових точках. Нижче

розміщені ображення heatmaps (RSSI, SINR, карта інтерференції), які при кліку відкриваються у великому вікні перегляду (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Heatmaps

Для порівняння ручного та оптимізованого розміщення реалізовано перемикач «Ручна конфігурація / Оптимізована конфігурація», який підтягує відповідні дані з бази результатів.

Запуск оптимізації здійснюється натисканням кнопки «Оптимізувати», розміщеної на панелі параметрів. На рисунку (3.15) представлено початкове не оптимізоване розміщення.

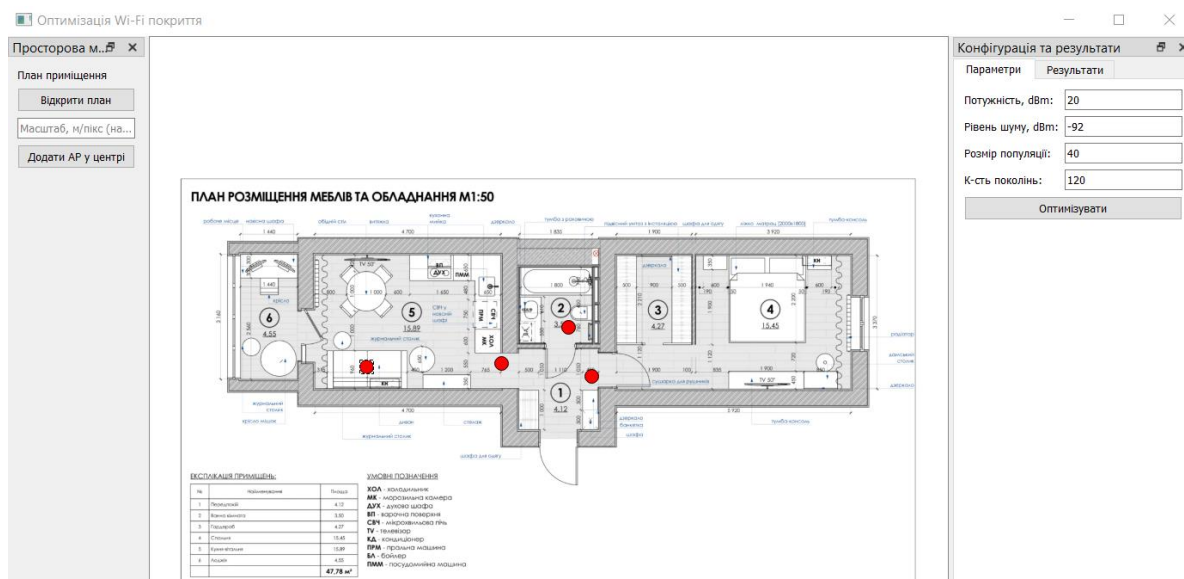


Рисунок 3.15 – Початкове не оптимізоване розміщення

Далі проводиться оптимізація, і обробник цієї події зчитує поточні параметри з полів інтерфейсу потім формує структуру конфігурації, еквівалентну JSON-файлу, передає її до оптимізаційного модуля як вхідні дані.

Далі створюється окремий фоновий потік, в якому виконується генетичний алгоритм, щоб не блокувати інтерфейс.

Під час роботи оптимізації використовується механізм сигналів та слотів Qt: оптимізаційний модуль після кожного покоління надсилає сигнал з проміжними результатами де зазначається цільова функція, кількість покращень та поточні координатами активної точки (рисунок 3.16). Головний потік отримує ці сигнали і оновлює візуальне розташування точок доступу, а також графік збіжності, який показує зміну інтегральної метрики $F(X)$ від номера покоління.

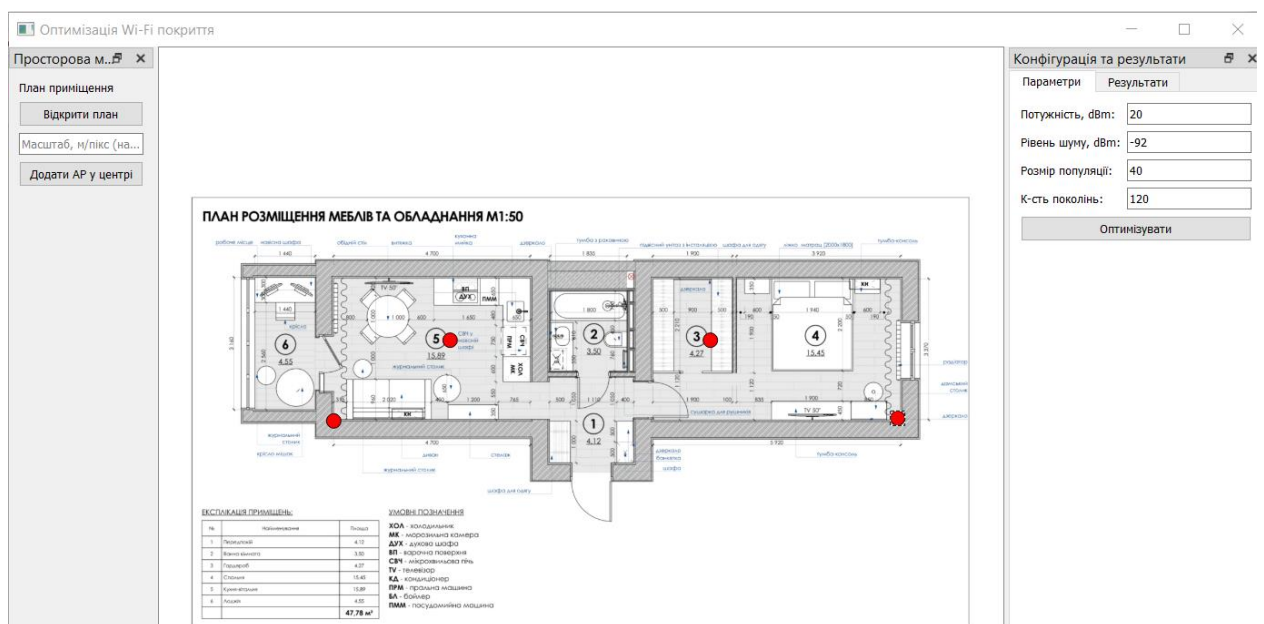


Рисунок 3.16 – Оптимізоване розміщення

Отже реалізований графічний інтерфейс забезпечує інтерактивний зв'язок між користувачем та обчислювальним ядром системи, користувач може вручну задати початкову конфігурацію, візуально оцінити розподіл покриття, запустити автоматичну оптимізацію, а потім порівняти отримане

рішення з початковим, як за чисельними показниками, так і за тепловими картами на плані приміщення.

Основні дії користувача реалізовано у вигляді послідовних кроків. Спочатку задаються параметри маршрутизаторів, їх потужність, стандарт 802.11ac/ax, список каналів. Далі користувач може вручну розставити точки доступу на плані — це формує базову конфігурацію, яка потім використовується як еталон для порівняння. Для цієї конфігурації система одразу генерує RF-heatmap, відображаючи розподіл RSSI, та обчислює всі метрики, такі як відсоток площі з рівнем сигналу не гіршим за -67 dBm, середній SNR, площу «мертвих зон», коефіцієнт інтерференції та пропускну здатність у наперед заданих тестових точках.

Наступним кроком є запуск оптимізаційного модуля. На відповідній вкладці користувач обирає алгоритм, задає розмір популяції, кількість поколінь, ймовірності кросоверу та мутації. Після натискання кнопки «Оптимізувати» система автоматично запускає багатоітераційний процес пошуку конфігурації, що максимізує інтегральну функцію якості. В режимі реального часу на екрані можна спостерігати еволюцію: зміну положення точок доступу, оновлення теплових карт, динаміку значення цільової функції по поколіннях.

Після завершення оптимізації система зберігає найкраще знайдене рішення та відображає його на окремій вкладці «Оптимізоване розміщення». Користувачу доступні перемикачі «До/Після», які дозволяють швидко порівняти ручну та автоматичну конфігурації як візуально (за RF-heatmaps), так і за чисельними показниками у вигляді таблиць.

Висновки до розділу 3

1. Реалізовано повноцінну архітектуру програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття, яка охоплює модуль імпорту плану, RF-модуль, модуль

обробки просторових даних, оптимізаційний модуль, сховище результатів та клієнтський інтерфейс.

2. Сформовано модель обробки просторових даних, де план будівлі перетворюється у дискретну сітку, для кожної комірки визначаються матеріали та будується граф проходження сигналу.

3. Розроблено механізм генерації RF-heatmaps, який включає послідовний розрахунок Path Loss, RSSI, SNR та SINR для кожної комірки простору.

4. Реалізовано оптимізаційний модуль на основі генетичного алгоритму з гнучкими параметрами: розмір популяції, кількість поколінь, ймовірності кросоверу та мутації, критерії зупинки.

5. Створено графічний інтерфейс, який забезпечує інтерактивну роботу користувача з системою. Також реалізовано режим порівняння «до/після», мініатюри heatmaps з можливістю детального перегляду, а також відображення динаміки збіжності алгоритму у часі.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено підхід до оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях, який поєднує просторово-радіочастотне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію та візуальний аналіз результатів. Сформовано узагальнену модель внутрішнього середовища в вигляді дискретизованої матриці з врахуванням геометрії приміщень, типів будівельних матеріалів, їхніх коефіцієнтів загасання та можливих позицій встановлення точок доступу.

2. На основі класичних радіочастотних моделей (FSPL, log-distance, ITU Indoor) побудовано механізм обчислення карт покриття та інтерференції. Для кожної комірки простору визначається RSSI, SNR, SINR, а також формується карта «мертвих зон» та зон із підвищеною взаємною завадою між точками доступу.

3. Запропоновано метод оптимізації розміщення маршрутизаторів на основі генетичного алгоритму. Де конфігурація мережі подається у вигляді вектора рішень, що описує позицію, канал і, за потреби, потужність кожної точки доступу. Розроблено багатокритеріальну функцію якості, яка одночасно враховує площу покриття, інтенсивність інтерференції, кількість «мертвих зон», середні значення SNR/SINR та число активних точок доступу. Також описано механізми селекції, кросоверу, мутації та комплексні критерії зупинки.

4. Розроблено архітектуру програмної системи оптимізації Wi-Fi покриття, що включає модулі імпорту плану приміщення, просторово-радіочастотного аналізу, оптимізації, оцінки якості, візуалізації heatmaps та клієнтський інтерфейс.

5. Реалізовано програмний прототип системи, який забезпечує завантаження планів у популярних графічних форматах, дискретизацію простору, побудову карт RSSI/SNR/SINR та інтерференції, запуск оптимізаційного процесу і відображення результатів у вигляді інтерактивних

теплових карт і табличних метрик. Інтерфейс дозволяє адміністратору змінювати вхідні параметри та аналізувати, як це впливає на покриття.

6. Проведено експериментальні дослідження на тестових планах приміщень. Дані тестування показали, що застосування запропонованого методу дає змогу зменшити площу «мертвих зон», підвищити середні значення RSSI й SNR та знизити рівень інтерференції між точками доступу порівняно з базовими або емпіричними схемами розміщення.

7. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розробленої системи, як інструменту підтримки прийняття рішень під час проектування і модернізації внутрішніх Wi-Fi мереж. Прототип можна застосовувати як на реальних проектах, так і в освітньому процесі для демонстрації впливу будівельних матеріалів, геометрії простору та параметрів мережі на якість покриття.

8. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі на багатоповерхові будівлі, інтеграція з реальними вимірюваннями для автоматичного калібрування параметрів радіочастотної моделі, застосування методів машинного навчання для уточнення прогнозу RSSI і оптимізації динамічного керування каналами та потужністю точок доступу в режимі реального часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

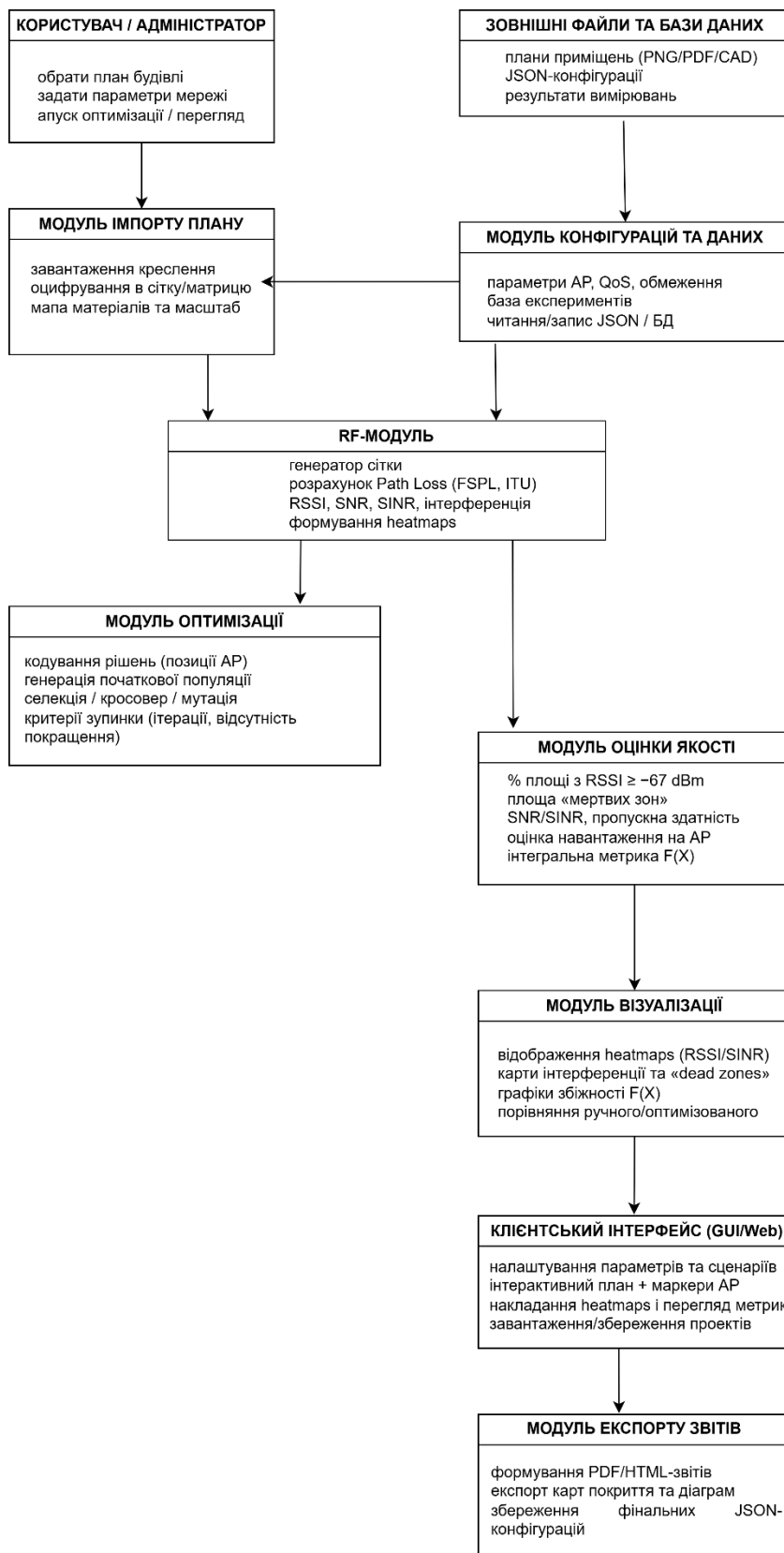
1. Siddiqi M., Alsharif M., Kim S. Indoor Path Loss Modeling and Prediction Techniques for Wireless Communication Systems. *Sensors*. 2019.
2. Al-Turjman F., Sabra A. A Novel Wireless Communication System for Smart Indoor Environments Using Wi-Fi and 802.11ax. *IEEE Systems Journal*. 2020.
3. Rappaport T., Xing Y. Wireless Communications and Propagation for 5G and Wi-Fi 6E. *IEEE Access*. 2021.
4. Siddiqi M., Alsharif M., Kim S. Indoor Path Loss Modeling and Prediction Techniques for Wireless Communication Systems. *Sensors*. 2019.
5. Almohammed A., Hua J. Deep Learning–Based Prediction of Indoor Wi-Fi Signal Strength Considering Building Materials. *Sensors*. 2022.
6. Zeng K., Li S., Zhang Z. A Survey of Indoor Propagation Models and Applications with Modern WLAN Standards. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022.
7. Chen Y., Lin J. RF Modeling for WLAN Planning in Complex Indoor Environments Using Hybrid Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2024.
8. Rappaport T., Xing Y. Wireless Communications and Propagation for 5G and Wi-Fi 6E. *IEEE Access*. 2021.
9. Elrahman S., Abdalla A. Performance Evaluation of IEEE 802.11ax Networks in Indoor Environments. *IEEE Access*. 2021.
10. IEEE Std 802.11ax-2021. Enhancements for High-Efficiency WLAN.
11. Al-Turjman F., Sabra A. A Novel Wireless Communication System for Smart Indoor Environments Using Wi-Fi and 802.11ax. *IEEE Systems Journal*. 2020.
12. Khayamnia S., Hamid M. Evaluation of Antenna Patterns and Orientation for Indoor WLAN Performance. *Electronics*. 2020.

13. Mehbodniya A., Eguchi K. Indoor Radio Wave Propagation and Smart Placement of Access Points for Wi-Fi 6 Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023.
14. Siddiqi M. et al. Indoor Path Loss Modeling and Prediction Techniques. *Sensors*, 2019.
15. Al-Turjman F., Sabra A. Smart Indoor Wi-Fi Environments. *IEEE Systems Journal*, 2020
16. Zeng K. et al. Indoor Propagation Models for Modern WLAN. *IEEE CST*, 2022.
17. Elrahman S., Abdalla A. IEEE 802.11ax Indoor Evaluation. *IEEE Access*, 2021.
18. Khayamnia S., Hamid M. Antenna Orientation for Indoor WLAN. *Electronics*, 2020.
19. Chen Y., Lin J. Hybrid Models for WLAN Planning. *IEEE TAP*, 2024.
20. Mehbodniya A., Eguchi K. Smart Placement of Access Points. *IEEE IoT Journal*, 2023.
21. Mehbodniya A., Eguchi K. Smart Placement of Access Points. *IEEE IoT Journal*, 2023.
22. Almohammed A., Hua J. Deep Learning–Based Prediction of Wi-Fi Signal Strength. *Sensors*, 2022.
23. Siddiqi M. et al. Indoor Path Loss Modeling and Prediction Techniques, *Sensors*, 2019.
24. Elrahman S., Abdalla A. IEEE 802.11ax Indoor Propagation Analysis, *IEEE Access*, 2021.
25. Rappaport T., Xing Y. Wireless Communications and Propagation for Wi-Fi 6E, *IEEE Access*, 2021.
26. Zeng K. et al. Indoor Propagation Models, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022.
27. ITU-R P.1238-10. Indoor Propagation Data and Prediction Methods, 2021.

28. Chen Y., Lin J. Hybrid WLAN Planning Models, IEEE TAP, 2024.
29. Almohammed A., Hua J. DL-Based Prediction of Wi-Fi Signal Strength, Sensors, 2022.
30. Elrahman S., Abdalla A. IEEE 802.11ax Indoor Propagation Analysis, IEEE Access, 2021.
31. Chen Y., Lin J. Hybrid WLAN Planning Models, IEEE TAP, 2024.
32. Кучар О. М., Осолінський О. Р., Система оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх мережах, IX Міжнародна мультидисциплінарна студентська наукова конференція «Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень», 28 листопада 2025 р., м. Рівне, Україна, С.634-637.
33. Кучар О. М., Осолінський О. Р., Модель оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх мережах, VI Міжнародна наукова конференція «Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики», 28 листопада 2025 р., м. Полтава., С. 411-413.
34. Комар М.П., Саченко А.О., Васильків Н.М., Загородня Д.І. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи з освітньо-професійної програми «Комп'ютерні науки» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» за другим (магістерським) рівнем вищої освіти. – Тернопіль: ЗУНУ, 2024. – 32 с.

Додаток А

Загальна архітектура системи



Додаток Б

Код модуля оптимізації

```

import sys
import json
import math

from PyQt5.QtCore import Qt, QPointF, pyqtSignal
from PyQt5.QtGui import (
    QPixmap,
    QBrush,
    QPen,
    QPainter,
    QLinearGradient,
    QColor,
)
from PyQt5.QtWidgets import (
    QApplication, QMainWindow, QGraphicsView, QGraphicsScene,
    QGraphicsPixmapItem, QGraphicsEllipseItem,
    QDockWidget, QWidget, QVBoxLayout, QFormLayout,
    QLineEdit, QPushButton, QLabel, QFileDialog,
    QTabWidget, QTableWidgetItem, QHBoxLayout,
    QDialog
)
class ClickableLabel(QLabel):
    clicked = pyqtSignal()
    def mousePressEvent(self, event):
        if event.button() == Qt.LeftButton:
            self.clicked.emit()
            super().mousePressEvent(event)
class FloorplanView(QGraphicsView):
    def __init__(self, parent=None):
        super().__init__(parent)
        self.scene = QGraphicsScene(self)
        self.setScene(self.scene)
        self.floorplan_item = None
        self.ap_items = [] # список графічних точок доступу
        self.setRenderHint(QPainter.Antialiasing)
    def load_floorplan(self, file_path: str):
        pixmap = QPixmap(file_path)
        if pixmap.isNull():
            return
        self.scene.clear()
        self.ap_items.clear()
        self.floorplan_item = QGraphicsPixmapItem(pixmap)
        self.scene.addItem(self.floorplan_item)
        self.setSceneRect(self.floorplan_item.boundingRect())

```

```

def add_ap(self, x: float, y: float):
    radius = 8
    ap = QGraphicsEllipseItem(-radius, -radius, 2 * radius, 2 * radius)
    ap.setBrush(QBrush(Qt.red))
    ap.setPen(QPen(Qt.black, 1))
    ap.setFlag(QGraphicsEllipseItem.ItemIsMovable, True)
    ap.setFlag(QGraphicsEllipseItem.ItemIsSelectable, True)
    ap.setPos(QPointF(x, y))
    self.scene.addItem(ap)
    self.ap_items.append(ap)

class LeftPanel(QWidget):

    def __init__(self, floor_view: FloorplanView, parent=None):
        super().__init__(parent)
        self.floor_view = floor_view
        layout = QVBoxLayout(self)
        self.btn_load = QPushButton("Відкрити план")
        self.scale_edit = QLineEdit()
        self.scale_edit.setPlaceholderText("Масштаб, м/пікс (наприклад 0.2)")
        self.btn_add_ap = QPushButton("Додати AP у центрі")
        layout.addWidget(QLabel("План приміщення"))
        layout.addWidget(self.btn_load)
        layout.addWidget(self.scale_edit)
        layout.addWidget(self.btn_add_ap)
        layout.addStretch()
        self.btn_load.clicked.connect(self.on_load_clicked)
        self.btn_add_ap.clicked.connect(self.on_add_ap_clicked)
        self.current_scale = 0.2 # за замовчуванням

    def on_load_clicked(self):
        path, _ = QFileDialog.getOpenFileName(
            self,
            "Виберіть файл плану",
            "",
            "Images (*.png *.jpg *.jpeg *.bmp)"
        )
        if path:
            self.floor_view.load_floorplan(path)

    def on_add_ap_clicked(self):
        if self.floor_view.floorplan_item is None:
            return
        rect = self.floor_view.floorplan_item.boundingRect()
        cx = rect.center().x()
        cy = rect.center().y()
        self.floor_view.add_ap(cx, cy)

    def get_scale(self) -> float:
        try:
            value = float(self.scale_edit.text())

```

```

        if value > 0:
            self.current_scale = value
    except ValueError:
        pass
    return self.current_scale
class ParamsPanel(QWidget):
    def __init__(self, parent=None):
        super().__init__(parent)
        form = QFormLayout(self)
        self.tx_power_edit = QLineEdit("20")
        self.noise_floor_edit = QLineEdit("-92")
        self.population_edit = QLineEdit("40")
        self.generations_edit = QLineEdit("120")
        form.addRow("Потужність, dBm:", self.tx_power_edit)
        form.addRow("Рівень шуму, dBm:", self.noise_floor_edit)
        form.addRow("Розмір популяції:", self.population_edit)
        form.addRow("К-сть поколінь:", self.generations_edit)
        self.btn_run = QPushButton("Оптимізувати")
        form.addRow(self.btn_run)
class ResultsPanel(QWidget):
    def __init__(self, parent=None):
        super().__init__(parent)
        self.heatmaps = {} # сюди покладемо пари (small, large)
        layout = QVBoxLayout(self)
        self.mode_label = QLabel("Режим: ручне розміщення")
        layout.addWidget(self.mode_label)
        self.table = QTableWidgetItem(5, 2)
        self.table.setHorizontalHeaderLabels(["Метрика", "Значення"])
        metrics = [
            "Площа з RSSI  $\geq$  -67 dBm",
            "Середній SNR",
            "Площа мертвих зон",
            "Коефіцієнт інтерференції",
            "Пропускна здатність (точки тест.)"
        ]
        for i, m in enumerate(metrics):
            item = QTableWidgetItem(m)
            self.table.setItem(i, 0, item)
            self.table.setItem(i, 1, QTableWidgetItem("-"))
        layout.addWidget(self.table)
        btn_layout = QHBoxLayout()
        self.btn_manual = QPushButton("Показати ручне")
        self.btn_optimized = QPushButton("Показати оптимізоване")
        btn_layout.addWidget(self.btn_manual)
        btn_layout.addWidget(self.btn_optimized)
        layout.addLayout(btn_layout)
        layout.addWidget(QLabel("Мініатюри heatmaps (натисніть для збільшення):"))

```

```

thumbs_layout = QHBoxLayout()
self.heatmap_label_rssi = ClickableLabel()
self.heatmap_label_sinr = ClickableLabel()
self.heatmap_label_interf = ClickableLabel()
for lbl in (self.heatmap_label_rssi,
            self.heatmap_label_sinr,
            self.heatmap_label_interf):
    lbl.setFixedSize(140, 90)
    lbl.setScaledContents(True)
col1 = QVBoxLayout()
col1.addWidget(self.heatmap_label_rssi)
col1.addWidget(QLabel("RSSI"))
col2 = QVBoxLayout()
col2.addWidget(self.heatmap_label_sinr)
col2.addWidget(QLabel("SINR"))
col3 = QVBoxLayout()
col3.addWidget(self.heatmap_label_interf)
col3.addWidget(QLabel("Інтерференція"))
thumbs_layout.addLayout(col1)
thumbs_layout.addLayout(col2)
thumbs_layout.addLayout(col3)
layout.addLayout(thumbs_layout)
layout.addStretch()
self._init_heatmaps()
self.heatmap_label_rssi.clicked.connect(
    lambda: self.show_heatmap_dialog("rssi")
)
self.heatmap_label_sinr.clicked.connect(
    lambda: self.show_heatmap_dialog("sinr")
)
self.heatmap_label_interf.clicked.connect(
    lambda: self.show_heatmap_dialog("interf")
)
def set_metrics_manual(self):
    values = [
        "78 %",
        "23 dB",
        "12 %",
        "0.34",
        "120 Мбіт/с"
    ]
    for i, v in enumerate(values):
        self.table.setItem(i, 1, QTableWidgetItem(v))

def set_metrics_optimized(self):
    values = [
        "92 %",

```

```

        "28 dB",
        "4 %",
        "0.18",
        "220 Mbit/c"
    ]
    for i, v in enumerate(values):
        self.table.setItem(i, 1, QTableWidgetItem(v))
def _create_gradient_pixmap(self, width: int, height: int,
                            c1: QColor, c2: QColor) -> QPixmap:
    pix = QPixmap(width, height)
    pix.fill(Qt.transparent)
    painter = QPainter(pix)
    grad = QLinearGradient(0, 0, width, height)
    grad.setColorAt(0.0, c1)
    grad.setColorAt(1.0, c2)
    painter.fillRect(0, 0, width, height, grad)
    painter.end()
    return pix
def _init_heatmaps(self):
    self.heatmaps["rssi"] = {
        "small": self._create_gradient_pixmap(
            140, 90, QColor(0, 255, 0), QColor(255, 0, 0)
        ),
        "large": self._create_gradient_pixmap(
            600, 400, QColor(0, 255, 0), QColor(255, 0, 0)
        ),
    }
    self.heatmaps["sinr"] = {
        "small": self._create_gradient_pixmap(
            140, 90, QColor(0, 0, 255), QColor(0, 255, 0)
        ),
        "large": self._create_gradient_pixmap(
            600, 400, QColor(0, 0, 255), QColor(0, 255, 0)
        ),
    }
    self.heatmaps["interf"] = {
        "small": self._create_gradient_pixmap(
            140, 90, QColor(255, 255, 0), QColor(255, 0, 255)
        ),
        "large": self._create_gradient_pixmap(
            600, 400, QColor(255, 255, 0), QColor(255, 0, 255)
        ),
    }
    self.heatmap_label_rssi.setPixmap(self.heatmaps["rssi"]["small"])
    self.heatmap_label_sinr.setPixmap(self.heatmaps["sinr"]["small"])
    self.heatmap_label_interf.setPixmap(self.heatmaps["interf"]["small"])
def show_heatmap_dialog(self, key: str):

```

```

if key not in self.heatmaps:
    return
pix = self.heatmaps[key]["large"]
dialog = QDialog(self)
titles = {
    "rssi": "Heatmap RSSI",
    "sinr": "Heatmap SINR",
    "interf": "Heatmap інтерференції"
}
dialog.setWindowTitle(titles.get(key, "Heatmap"))
vbox = QVBoxLayout(dialog)
lbl = QLabel()
lbl.setPixmap(pix)
lbl.setScaledContents(True)
vbox.addWidget(lbl)
dialog.resize(640, 450)
dialog.exec_()

class MainWindow(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setWindowTitle("Оптимізація Wi-Fi покриття")
        self.resize(1200, 800)
        self.floor_view = FloorplanView()
        self.setCentralWidget(self.floor_view)
        self.left_panel = LeftPanel(self.floor_view)
        left_dock = QDockWidget("Просторова модель", self)
        left_dock.setWidget(self.left_panel)
        left_dock.setAllowedAreas(Qt.LeftDockWidgetArea)
        self.addDockWidget(Qt.LeftDockWidgetArea, left_dock)
        self.params_panel = ParamsPanel()
        self.results_panel = ResultsPanel()
        right_tabs = QTabWidget()
        right_tabs.addTab(self.params_panel, "Параметри")
        right_tabs.addTab(self.results_panel, "Результати")
        right_dock = QDockWidget("Конфігурація та результати", self)
        right_dock.setWidget(right_tabs)
        right_dock.setAllowedAreas(Qt.RightDockWidgetArea)
        self.addDockWidget(Qt.RightDockWidgetArea, right_dock)
        self.params_panel.btn_run.clicked.connect(self.on_optimize_clicked)
        self.results_panel.btn_manual.clicked.connect(self.on_show_manual_clicked)

self.results_panel.btn_optimized.clicked.connect(self.on_show_optimized_clicked)
self.results_panel.set_metrics_manual()
def optimize_layout_simple(self):
    if self.floor_view.floorplan_item is None:
        return
    rect = self.floor_view.floorplan_item.boundingRect()

```

```

n = len(self.floor_view.ap_items)
if n == 0:
    cx = rect.center().x()
    cy = rect.center().y()
    self.floor_view.add_ap(cx, cy)
    n = 1
rows = int(math.sqrt(n))
cols = math.ceil(n / rows)
step_x = rect.width() / (cols + 1)
step_y = rect.height() / (rows + 1)
for idx, ap_item in enumerate(self.floor_view.ap_items):
    r = idx // cols
    c = idx % cols
    x = rect.left() + (c + 1) * step_x
    y = rect.top() + (r + 1) * step_y
    ap_item.setPos(QPointF(x, y))
def on_optimize_clicked(self):
    self.optimize_layout_simple()
    self.results_panel.mode_label.setText("Режим: оптимізоване розміщення")
    self.results_panel.set_metrics_optimized()
def on_show_manual_clicked(self):
    aps = []
    for ap_item in self.floor_view.ap_items:
        pos = ap_item.pos()
        aps.append({
            "x_px": pos.x(),
            "y_px": pos.y()
        })
    config = {
        "mode": "manual",
        "aps": aps
    }
    print("=== Поточна конфігурація AP (ручне розміщення) ===")
    print(json.dumps(config, indent=2, ensure_ascii=False))
    print("=====")
    self.results_panel.mode_label.setText("Режим: ручне розміщення")
    self.results_panel.set_metrics_manual()
def on_show_optimized_clicked(self):
    aps = []
    for ap_item in self.floor_view.ap_items:
        pos = ap_item.pos()
        aps.append({
            "x_px": pos.x(),
            "y_px": pos.y()
        })
    config = {
        "mode": "optimized_simple_grid",

```

```
        "aps": aps
    }
    print("=== Поточна конфігурація AP (оптимізоване розміщення) ===")
    print(json.dumps(config, indent=2, ensure_ascii=False))
    print("=====")

    self.results_panel.mode_label.setText("Режим: оптимізоване розміщення")
    self.results_panel.set_metrics_optimized()

def main():
    app = QApplication(sys.argv)
    window = MainWindow()
    window.show()
    sys.exit(app.exec_())

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Додаток В
Апробація отриманих результатів

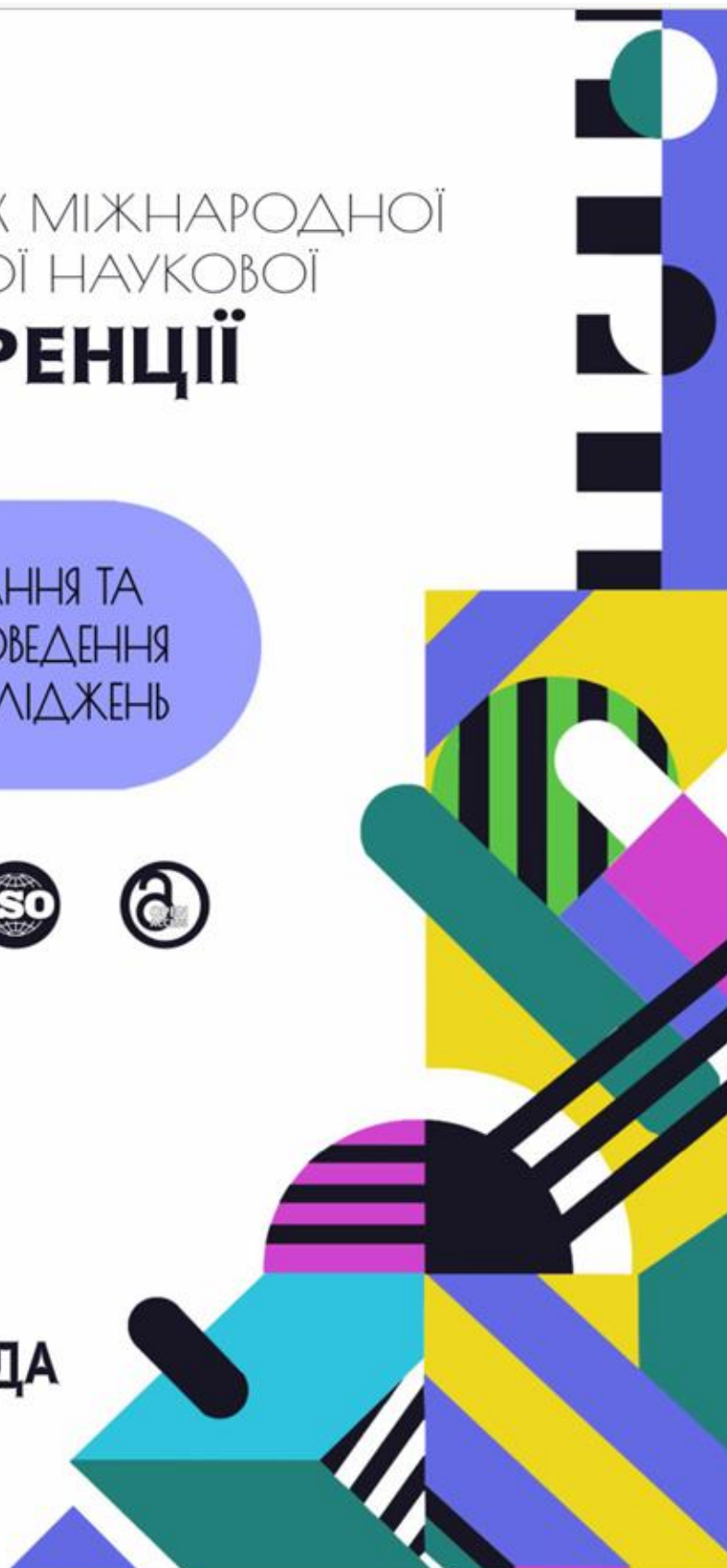
МАТЕРІАЛИ ІХ МІЖНАРОДНОЇ
СТУДЕНТСЬКОЇ НАУКОВОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТА
ПЕРСПЕКТИВИ ПРОВЕДЕННЯ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



М. РІВНЕ, УКРАЇНА

**28 ЛИСТОПАДА
2025 РІК**



**МОЛОДІЖНА
НАУКОВА
ЛІГА** 

МАТЕРІАЛИ ІХ МІЖНАРОДНОЇ
СТУДЕНТСЬКОЇ НАУКОВОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

.....

**АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТА
ПЕРСПЕКТИВИ ПРОВЕДЕННЯ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

.....

м. Рівне, Україна
28 листопада 2025 рік

Вінниця, Україна
«UKRLOGOS Group»
2025

**УДК 082:001
А 43**



Голова оргкомітету: Коренюк І.О.

Верстка: Білуєс Т.В.

Дизайн: Бондаренко І.В.

Рекомендовано до видання Вченою Радою Інституту науково-технічної інтеграції та співпраці. Протокол № 47 від 27.11.2025 року.



Конференцію зареєстровано Державною науковою установою «УкрІНТЕІ» в базі даних науково-технічних заходів України та бюлетені «План проведення наукових, науково-технічних заходів в Україні» (Посвідчення № 458 від 10.06.2025).

Матеріали конференції знаходяться у відкритому доступі на умовах ліцензії Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

.....
Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень:
 А 43 матеріали ІХ Міжнародної студентської наукової конференції,
 м. Рівне, 28 листопада, 2025 рік / ГО «Молодіжна наукова ліга». —
 Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2025. — 998 с.

ISBN 978-617-8582-02-9

DOI 10.62732/liga-inter-28.11.2025

Викладено матеріали учасників ІХ Міжнародної мультидисциплінарної студентської наукової конференції «Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень», яка відбулася 28 листопада 2025 року у місті Рівне, Україна.

УДК 082:001

© Колектив учасників конференції, 2025

© ГО «Молодіжна наукова ліга», 2025

© ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2025

ISBN 978-617-8582-02-9

СЕКЦІЯ 19. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

ENGLISH AS A GLOBAL LANGUAGE OF CYBERSECURITY COOPERATION Roi Ye., Olefirenko I., <i>Scientific supervisor: Bukovska I.</i>	599
THE ROLE OF ENGLISH IN INTERNATIONAL CYBERSECURITY COLLABORATION Skrylnyk V., Kononenko I., <i>Scientific supervisor: Bukovska I.</i>	602
АНАЛІЗ РИНКУ ТА ВИЯВЛЕННЯ КОНКУРЕНТНИХ ПЕРЕВАГ МОБІЛЬНИХ ФІТНЕС-ЗАСТОСУНКІВ Павлюк Д.С., <i>Науковий керівник: Сичков В.С.</i>	605
ВИКОРИСТАННЯ ГЛИБОКИХ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ В МЕРЕЖЕВОМУ ТРАФІКУ Костомаров Є.І., Овчаренко Т.О.	608
ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМУВАННЯ У РОЗРОБЦІ КІБЕРБЕЗПЕКОВИХ РІШЕНЬ НОВОГО ПОКОЛІННЯ Лісімова К.А., <i>Науковий керівник: Федотов С.О.</i>	610
ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ «ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА» НА БАЗІ ДАНИХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ЗІ SCADA-СИСТЕМ Скріпка В.О., <i>Науковий керівник: Папченко Т.В.</i>	613
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ БАГАТОКАМЕРНОГО ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗА УМОВ ЗМІНИ ЗОВНІШНЬОГО ВИГЛЯДУ І СЕРЕДОВИЩА Забара П.В., <i>Науковий керівник: Родіонов А.М.</i>	615
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОГОДНИХ УМОВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЙ АКТИВНОСТЕЙ Іванова Ю.С.	618
ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ СХОЖИХ ФРАГМЕНТІВ У ПРОГРАМНОМУ КОДІ Клебан Д.А., <i>Науковий керівник: Полягушко Л.Г.</i>	622
ОПТИМІЗАЦІЯ NODE.JS СЕРВІСІВ У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ІО-СИСТЕМАХ Корінь В.Е.	625
ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЗАДОВОЛЕНOSTІ ПАСАЖИРІВ КП «ХАРКІВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН» ЗА МЕТОДИКОЮ CSI Бабасва А.О., <i>Науковий керівник: Мощенко І.О.</i>	627
РОЗРОБКА ЕВРИСТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДИНАМІЧНОГО ЦІНОУТВОРЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ БРОНЮВАННЯ РЕКРЕАЦІЙНИХ ЗАКЛАДІВ Лащук М.Т.	630
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ КЛІЄНТІВ РЕСТОРАНУ ЗА ПОВЕДІНКОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ Корзун В.Р., <i>Науковий керівник: Чорна О.С.</i>	632
СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ Wi-Fi МАРШРУТИЗАТОРІВ У ВНУТРІШНІХ МЕРЕЖАХ Кучар О.М., <i>Науковий керівник: Осолінський О.Р.</i>	634

Кучар Олександр Михайлович, магістр спеціальності “Комп’ютерні науки”
Західноукраїнський національний університет, Україна

Науковий керівник: Осолінський Олександр Романович, канд.техн.наук,
доцент кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління
Західноукраїнський національний університет, Україна

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ Wi-Fi МАРШРУТИЗАТОРІВ У ВНУТРІШНІХ МЕРЕЖАХ

Вступ

Зростання кількості бездротових пристроїв, поява стандартів IEEE 802.11ac/ax та використання діапазонів 5 і 6 ГГц ускладнили завдання проєктування внутрішніх Wi-Fi мереж. Комерційні засоби радіопланування частково розв’язують ці проблеми, але є закритими, дорогими та мало придатними для гнучких досліджень або навчальних цілей [3].

Останні роботи демонструють ефективність поєднання точніших моделей поширення сигналу з евристичними й еволюційними методами оптимізації, які дозволяють автоматично шукати конфігурації розміщення точок доступу [4–6]. Тому було запропоновано та реалізовано програмну систему оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх приміщеннях, яка є прототипом інструменту підтримки прийняття рішень для проєктування та модернізації Wi-Fi мереж.

Архітектура системи оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів

Архітектура розробленої системи побудована так, щоб забезпечити цикл від завантаження плану будівлі та його оцифрування до розрахунку радіочастотних характеристик, виконання оптимізації і візуалізації результатів в зручній формі для користувача. Система (рисунк 1) складається з наступних взаємопов’язаних модулів:

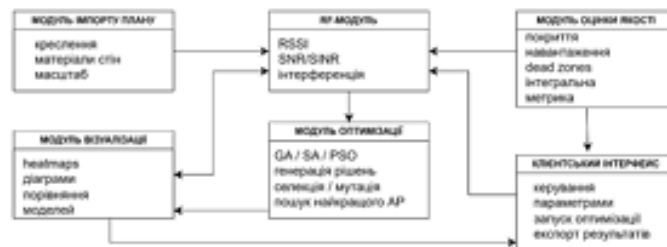


Рис. 1. Архітектура системи оптимізації Wi-Fi

Першим елементом архітектури є модуль, який забезпечує завантаження планів у форматах PNG, JPG, PDF або SVG. План конвертується у внутрішню цифрову матрицю, де кожен піксель або елемент сітки відповідає певній частині приміщення. Структура будівлі представляється у вигляді багатопланового опису: стіни, двері, перегородки, несучі конструкції, а також матеріали, які впливають на коефіцієнт загасання сигналу. На цьому етапі створюється карта перешкод, що використовується подальшим RF-модулем.

Модуль також дозволяє задавати масштаб приміщення, фізичні параметри матеріалів (бетон, гіпсокартон, скло, метал), а також визначати зони з особливими вимогами до якості покриття, наприклад, аудиторії, конференц-зали, виробничі ділянки або коридори.

Ще одним компонентом системи є модуль радіочастотного моделювання, який відповідає за обчислення RSSI, SNR, SINR, пропускну здатності та рівня інтерференції в кожній точці мапи. Він використовує моделі загасання сигналу, що описані у попередніх розділах, з врахуванням відстані між маршрутизатором і точкою на сітці, направленості антени, кількості та типів стін, перекриття частотного спектра між сусідніми точками доступу.

Модуль здатний швидко обчислювати RF-heatmap для будь-якого набору координат точок доступу. Отримана матриця використовується як основа для подальшої оптимізації.

Проміжне сховище забезпечує зберігання вхідних параметрів приміщення та результати попередніх ітерацій оптимізації, таких як матриці RSSI, SNR, SINR, карти інтерференції, інформацію про навантаження на кожен активну точку. Завдяки цьому система може проводити порівняльний аналіз, будувати гістограми покращення, визначати тенденції збіжності алгоритму, а також виконувати rollback до попереднього рішення, якщо нове виявилось гіршим.

Система також підтримує гарячу заміну параметрів: користувач може змінювати вихідні характеристики антени, потужність передавача, канали або типи матеріалів без повного перезапуску процесу. Це важливо для реальних сценаріїв налаштування мережі, коли зміна лише одного параметра може вплинути на весь розрахунок покриття.

Клієнтський інтерфейс візуалізує дані та дозволяє користувачу запускати оптимізацію, переглядати альтернативні сценарії або експортувати карти покриття у PDF або PNG. Таким чином архітектура системи поєднує обчислювальне ядро та зручний для користувача інтерфейс, що робить її придатною, як для дослідницьких задач, так і для практичного використання інженерами з мереж.

Модуль візуалізації та клієнтський інтерфейс.

Прототип реалізовано як настільний застосунок (рисунок 2). Центральна область показує plan-view будівлі з накладеними піктограмами AP, які можна переміщувати мишею.



Рис. 2. Розміщення точок доступу

Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень

Додаткові вікна відображають теплові карти (рисунок 3) RSSI, SNR та інтерференції (рисунок 4), а також табличні метрики для ручної й оптимізованої конфігурації.



Рис. 3. Теплові карти

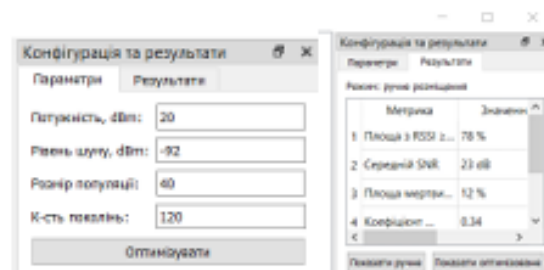


Рис. 4. Координати точок

Також передбачено можливість швидко перемикатися між варіантами, масштабувати план, переглядати статистику по окремих зонах.

Завдяки модульній архітектурі систему можна розширювати замінюючи модель загасання, підключати альтернативні алгоритми оптимізації, додавати модуль збору реальних вимірювань сигналу для калібрування моделі, змінити ваги критеріїв, повторно запустити оптимізацію, візуально порівняти різні варіанти та вибрати той, який найкраще відповідає практичним обмеженням, інтегруватися з системами моніторингу мережі [5; 7].

Висновки. Було запропоновано архітектуру програмної системи оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів, що може реалізувати етапи імпорту плану будівлі та формування просторово-радіочастотної моделі до оптимізації конфігурації та візуалізації результатів. Крім того розроблено механізм опису параметрів середовища, обладнання та алгоритму у вигляді JSON-конфігурації, що забезпечує гнучке налаштування системи під різні об'єкти без зміни програмного коду. Крім того оптимізаційний модуль на основі генетичного алгоритму використовує функцію якості, яка враховує покриття, «мертві зони», рівень інтерференції та перевантаження AP. Це дозволяє отримувати збалансовані конфігурації, орієнтовані не лише на максимізацію RSSI, а й на якість обслуговування користувачів.

Реалізований графічний інтерфейс забезпечує інтерактивну роботу з планами приміщень, візуалізацію теплових карт та порівняння ручних і автоматично оптимізованих схем розміщення.

Список використаних джерел:

1. Elrahman S., Abdalla A. IEEE 802.11ax indoor evaluation // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 115 430–115 445.
2. Siddiqi M., Iqbal Z., Shafiq M. Indoor path loss modeling and prediction techniques // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, No. 15. – P. 1–24.
3. Chen Y., Lin J. Hybrid models for WLAN planning in complex indoor environments // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2024. – Vol. 72, No. 2. – P. 1850–1863.
4. Mehbodniya A., Eguchi K. Smart placement of access points in dense Wi-Fi deployments using evolutionary algorithms // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2023. – Vol. 10, No. 5. – P. 4213–4225.
5. Almohammedi A., Hua J. Deep learning-based prediction of Wi-Fi signal strength for indoor coverage optimization // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 1–19.
6. Лемешко, А. В., Макаренко, А. О., Руденко, Н. В., & Березнюк, А. В. (2020). Інноваційний підхід до традиційних методів проектування бездротових комп'ютерних мереж. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*, (2), 5-11.
7. WirelessDesignPros. Access Point Design for Optimal Wireless Network Performance [Електронний ресурс]. – 11.06.2024. – Режим доступу: <https://www.wirelessdesignpros.com/blog/access-point-design-for-optimal-wireless-network-performance> (дата звернення: 22.11.2025)

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

З МАТЕРІАЛАМИ VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

28 ЛИСТОПАДА 2025 РІК

М. ПОЛТАВА, УКРАЇНА

**«ПЕРІОД ТРАНСФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ
В СВІТОВІЙ НАУЦІ: ЗАДАЧІ ТА ВИКЛИКИ»**



ЗБІРНИК НАУКОВИХ
ПРАЦЬ З МАТЕРІАЛАМИ
VI МІЖНАРОДНОЇ
НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ



ПЕРІОД ТРАНСФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В СВІТОВІЙ НАУЦІ: ЗАДАЧІ ТА ВИКЛИКИ

| 28 листопада 2025 рік
м. Полтава, Україна

Вінниця, Україна
«UKRLOGOS Group»
2025

УДК 082:001
П 26



Організація, від імені якої випущено видання:

ГО «Міжнародний центр наукових досліджень»

Номер запису організації в Єдиному реєстрі громадських об'єднань: 1499141.

Голова оргкомітету: Сотник С.Г.

Верстка: Бабич Ю.В.

Дизайн: Бондаренко І.В.

Рекомендовано до видання Вченою Радою Інституту науково-технічної інтеграції та співпраці. Протокол № 47 від 27.11.2025 року.



Конференцію зареєстровано Державною науковою установою у сфері управління Міністерства освіти і науки «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації» в базі даних науково-технічних заходів України на поточний рік та бюлетені «План проведення наукових, науково-технічних заходів в Україні» (Посвідчення № 497 від 10.06.2025).

Збірник наукових праць з матеріалами конференції видано офіційно суб'єктом видавничої справи зі **Свідоцтвом ДК № 7860 від 22.06.2023**.

Матеріали конференції знаходяться у відкритому доступі на умовах ліцензії *Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0)*.

П 26 **Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики:** збірник наукових праць з матеріалами VI Міжнародної наукової конференції, м. Полтава, 28 листопада, 2025 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. — Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2025. — 872 с.

ISBN 978-617-8312-94-7

DOI 10.62731/mcnd-28.11.2025

Викладено матеріали учасників VI Міжнародної наукової конференції «Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики», яка відбулася 28 листопада 2025 року у місті Полтава.

УДК 082:001

© Колектив учасників конференції, 2025

© ГО «Міжнародний центр наукових досліджень», 2025

ISBN 978-617-8312-94-7

© ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2025

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ЗАДАЧАХ РОЗПИЗНАВАННЯ РУХІВ ЛЮДИНИ: ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ Курян В. А.	408
МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ Wi-Fi МАРШРУТИЗАТОРІВ У ВНУТРІШНІХ МЕРЕЖАХ Кучар О. М.	411
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ДІЯЛЬНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ ЦЕНТРІВ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ Лисенко Т. В.	414
АКТУАЛЬНІ ЗАГРОЗИ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В ЕКОСИСТЕМАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IoT) Мацшин А. А.	418
НАУКОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗСЛІДУВАННЯ КІБЕРІНЦИДЕНТІВ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ОЦІНКИ РИЗИКІВ Орлов Р. Р.	421
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ГІБРИДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ДО КОРЕЛЯЦІЙНИХ АТАК Савельєв Д. Є.	429
БАГАТОРІВНЕВА ВЕБ-СИСТЕМА ЗБОРУ ТА АНАЛІТИКИ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ Скиба В. О.	436
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АДМІНІСТРУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ Улянченко М. Ю.	444
АНАЛІЗ ВНУТРІШНІХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕБСАЙТУ ЯК ОСНОВА ЕФЕКТИВНОЇ SEO-ОПТИМІЗАЦІЇ Шабуня Д. Є.	450
СЕКЦІЯ XX.	
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ	
РЕГРЕСІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ УЧНІВ Борзов С. О., Науменко Т. С., Щербакова В. С.	455
ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ В ПРИРОДНИЧИХ НАУКАХ ТА НАУКАХ ПРО ЖИТТЯ: ЗАДАЧІ ТА ВИКЛИКИ Галдіна О. М., Філоненко Н. Ю.	458
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ АТАК ПІДМІНИ СИГНАЛУ GPS НА БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ Зозулюк В. В.	462

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ Wi-Fi МАРШРУТИЗАТОРІВ У ВНУТРІШНІХ МЕРЕЖАХ

Кучар Олександр Михайлович

Магістр спеціальності «Комп'ютерні науки»
Західноукраїнський національний університет, Україна

Науковий керівник: Осолінський Олександр Романович

ORCID ID: 0000-0002-0136-395X
канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційно-обчислювальних
систем і управління
Західноукраїнський національний університет, Україна

Вступ

Бездротові мережі стандартів IEEE 802.11 сьогодні є базовою інфраструктурою для доступу до Інтернету в офісах, навчальних закладах, медичних установах та громадських просторах. Зростання кількості клієнтів, поява сервісів з високими вимогами до пропускної здатності і щільне розміщення точок доступу роблять задачу планування Wi-Fi покриття все більш складною [1–3].

Традиційний підхід, коли розміщення маршрутизаторів визначається вручну за емпіричними правилами або за результатами декількох вимірювань, часто приводить до наявності «мертвих зон», нестабільних швидкостей і низької якості обслуговування користувачів [4].

Тому є потреба в розробці інших методів організації розміщення активних точок, які б дозволяли перетворювати план будівлі, параметри маршрутизаторів та вимоги до сервісів у задачу оптимізації що в свою чергу автоматизувуватиме процес пошуку розташування точок доступу з врахуванням реальних обмежень [5–7].

Модель оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів

Просторово-радіочастотна модель будівлі

В основі моделі лежить дискретне подання внутрішнього простору будівлі. План поверху перетворюється у прямокутну матрицю клітин із заданим кроком. Для кожної клітинки зберігається інформація про тип простору, а також перелік стін і перешкод на шляху між цією клітинкою та кожною потенційною позицією маршрутизатора. Матеріали стін описуються коефіцієнтами додаткових втрат. Це дозволяє вже на етапі

формування карти середовища задати необхідні параметри для радіочастотної моделі.

$$X = \{(p_i, c_i, t_i)\}, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

Де p_i — позиція, c_i — канал, t_i — рівень потужності.

Це дозволяє вибирати кількість, координат, каналів і потужностей маршрутизаторів та вирішувати задачу оптимізації в дискретному просторі.

Модель поширення сигналу та розрахунок показників RSSI, SNR, SINR

Для моделювання загасання сигналу використовується логарифмічна модель шляху з врахуванням втрат на перешкодах:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_a, \quad (2)$$

Де $PL(d_0)$ — базове загасання на відстані d_0 , n — показник середовища, X_a — додаткові втрати для стін, меблів, перекриття.

Отриманий рівень сигналу в клітинці (i, j) обчислюється за співвідношенням

$$RSSI(i, j) = P_{tx} - PL(i, j), \quad (3)$$

де P_{tx} — потужність передавача, а $PL(i, j)$

$PL(i, j)$ — повні втрати сигналу на шляху з врахуванням відстані й перешкод.

На основі RSSI розраховуються показники SNR та SINR. Співвідношення сигнал/шум визначається як

$$SNR = RSSI(i, j) - N_{noise} \quad (4)$$

де N_{noise} — рівень шуму приймача. При наявності декількох точок доступу у тій самій частотній смузі формується інтерференційна складова; тоді SINR враховує суму потужностей заважаючих сигналів. Це дозволяє вже на моделюванні оцінювати якість роботи мережі. Результатом роботи радіочастотного модуля є набори heatmap-карт де показано рівень сигналу, карту інтерференції та карту «мертвих зон».

Алгоритм оптимізації розміщення маршрутизаторів

Для пошуку конфігурації, що максимізує $F(X)$ використовується генетичний алгоритм. Рішення кодуються у вигляді «хромосом», де для кожної точки доступу зберігаються координати, канал і потужність. Початкова популяція формується випадково з де можна розмістити точки.

В кожному поколінні:

1. обчислюється значення $F(X)$;

2. найкращі рішення відбираються методом турнірної селекції;
3. виконується кросовер;
4. застосовується мутація з невеликою ймовірністю, тобто випадкове зміщення однієї точки доступу, зміна каналу або потужності.

Для контролю збіжності алгоритм порівнює поточне найкраще значення функції якості з глобально найкращим результатом, знайденим від початку роботи.

Результатом роботи алгоритму є одна або кілька конфігурацій з найбільшими значеннями $F(X)$. Вони можуть бути використані як рекомендації для реального розгортання мережі.

Висновки. Було запропоновано формалізовану модель оптимального розміщення Wi-Fi маршрутизаторів у внутрішніх мережах, яка поєднує просторово-радіочастотне подання будівлі, модель поширення сигналу та інтегральну метрику якості покриття і якості обслуговування. Такий підхід дозволяє перейти від емпіричного налаштування до системного проектування бездротової інфраструктури.

Запропоновано використання генетичного алгоритму для пошуку оптимальної конфігурації маршрутизаторів.

Отримана модель може бути покладена в основу програмного інструменту для планування Wi-Fi мереж.

Список використаних джерел:

1. Hosseini H., Zainal Abidin A., Samad S., Hashim F., Abdullah N. S. NSGA-II based optimal Wi-Fi access point placement for indoor localization using BIM integration. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 158. Art. 105051.
2. Sun M. Enhanced Genetic Algorithm-Based Wi-Fi Access Points Deployment. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3746.
3. Shah S. J. A., Mufti N., Ahmad T. Optimized Coverage and Capacity Planning of Wi-Fi Network based on Radio Frequency Modeling & Propagation Simulation. *International Journal of Innovations in Science & Technology*. 2024. Vol. 6, No. 5. Pp. 63–73.
4. Ma S., Zhu X., Liu Y., et al. A Practical Approach to Indoor Path Loss Modeling Based on Deep Learning. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 129836–129848. URL:
5. Jazea N. A., Ali M. H., Sherif N. H. Study and Analysis Indoor Path Loss Models for Low-Terahertz mmWaves. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024. Vol. 11, No. 8. Pp. 2219–2226.
6. E-Server. Найкращі практики розміщення точок доступу Wi-Fi та політики безпеки: аналітичний блог компанії E-Server. 2024. URL:<https://e-server.com.ua/uk/poradi/naikrashhi-praktiki-rozmishhennia-tocok-dostupu-wi-fi-ta-politiki-bezpeki>
7. Maxnet. Поради щодо правильного розміщення Wi-Fi роутера в оселі URL:<https://maxnet.ua/blog/poradi-shodo-pravilnogo-rozmishhennya-wi-fi-routera-v-oseli/>