

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-82>

УДК 621.391:004.8

СІДЕНЬ СЕРГІЙ

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-8708-0706>e-mail: ssiden@suitt.edu.ua**ЦАРЬОВ РОМАН**

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0001-9897-9672>e-mail: r.y_tsarov@suitt.edu.ua, rcarev@gmail.com**КІЙКО СВІТЛАНА**

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-4057-096X>e-mail: s.m_kiiko@suitt.edu.ua**БУБЕНЦОВА ЛЮДМИЛА**

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0009-0007-2507-3475>e-mail: ics@suitt.edu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПЛАТФОРМ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Роботу присвячено розв'язанню задачі структурної оптимізації сучасних сервісних платформ на базі бездротових технологій, таких як LTE, 5G та Wi-Fi. Обґрунтовано доцільність застосування еволюційних алгоритмів для розв'язання нелінійних, багатопараметричних задач реконфігурації мереж. Розроблена математична модель, що дозволяє оптимізувати топологію платформи шляхом максимізації середньої швидкості передачі даних з явним урахуванням внутрішньосистемних завад. Ефективність запропонованого підходу підтверджено імітаційним моделюванням оптимізації сервісної платформи на бездротовій технології в умовах торгового центру. Результати показали, що оптимізація на основі генетичного алгоритму покращує рівномірність покриття, зменшує кількість зон із низькою пропускну здатністю та підвищує загальну якість обслуговування (QoS).

Ключові слова: оптимізація, сервісна платформа, радіотехнологія, генетичний алгоритм, відношення сигнал/завада+шум.

SIDEN SERHII**TSAROV ROMAN****KIICO SVITLANA****BUBENTSOVA LIUDMYLA**

State university of intelligent technologies and telecommunications

OPTIMIZATION OF THE TOPOLOGICAL STRUCTURE OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION PLATFORMS BASED ON A GENETIC ALGORITHM

This study addresses the problem of structural optimization of modern service platforms, with particular attention to those based on wireless radio technologies such as LTE, 5G, and Wi-Fi. Given the increasing complexity of wireless environments and the growing demand for high-throughput, low-latency communication services, ensuring efficient resource allocation and infrastructure placement becomes a critical task. The paper presents a comprehensive analysis of conventional optimization techniques and identifies their limitations when applied to nonlinear, multi-parameter network planning problems. As a response, the feasibility and advantages of genetic algorithms (GAs) are substantiated. Unlike traditional deterministic approaches, GAs exhibit strong global search capabilities, making them especially suitable for problems characterized by discrete solution spaces and the presence of multiple local optima.

The key contribution of this research is the development of a universal mathematical model designed for the structural optimization of service platforms. The model explicitly incorporates the effects of intra-system interference caused by overlapping coverage from adjacent base stations and terminal devices which is a major limiting factor in dense network deployments. By integrating parameters such as the spatial coordinates of base stations, received signal strength, signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), and user-level throughput, the model enables robust estimation and maximization of average data rates across the network.

The proposed approach was validated using a simulation scenario modeling the deployment of a wireless service platform in a shopping mall environment. Results confirmed the effectiveness of GA-based optimization in improving coverage uniformity, reducing the number of low-throughput areas, and increasing the overall quality of service (QoS). The resulting topology was more balanced and aligned with the spatial distribution of users, leading to improved performance and spectral efficiency.

The developed model and algorithm offer a flexible and scalable framework for intelligent radio network design in interference-limited conditions. Future research directions include software implementation, support for multi-floor and 3D environments, and integration with predictive models based on user mobility and traffic patterns.

Keywords: optimization, service platform, radio technology, genetic algorithm, signal-to-interference-plus-noise ratio.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Сучасні інформаційні та телекомунікаційні технології створюють технологічний базис який надає майже необмежені можливості зі створення різноманітних мережевих сервісних платформи для

виробництва та надання інформаційно-комунікаційних мережевих сервісів. Сервісна платформа є ключовим елементом виробництва та надання сучасних мережевих послуг, структуру якої (рис. 1) можна формалізувати у вигляді трьох базових компонентів – сукупність інформаційних та телекомунікаційних ресурсів, система управління та споживачі сервісів [1].

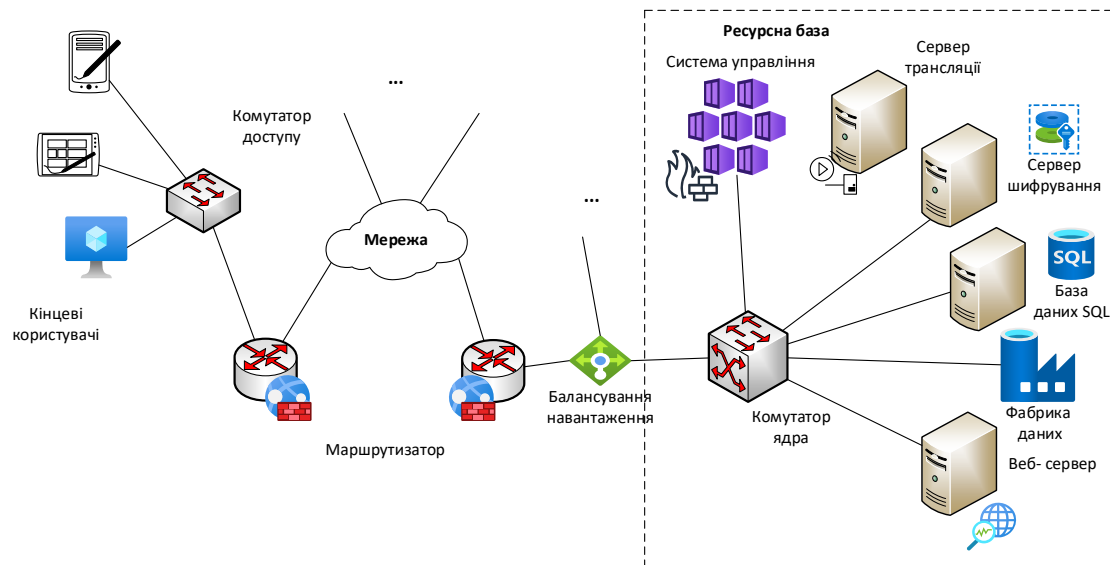


Рис. 1. Спрощена структурна схема сучасної сервісної платформи

Очевидним є наступні факти:

1. Множина мережевих послуг активно розвивається і постійно доповнюється новими послугами.

2. Сучасні мережеві послуги формують вимоги щодо сервісної платформи, як ключового елемента з їх виробництва.

3. Розробка окремої сервісної платформи для кожної нової послуги є економічно недоцільною. Відтак, актуальною проблемою є розробка адаптивної моделі сервісної платформи, що зумовлює необхідність розв'язання задачі динамічної оптимізації.

Динамічна оптимізація сервісної платформи може розглядатись у контексті структурної або параметричної оптимізації.

У контексті загальної теорії оптимізації [2], процес удосконалення об'єкта шляхом модифікації його параметрів визначається як параметрична оптимізація. Цей тип оптимізації ініціюється системою управління, яка, аналізуючи поточний та оптимальний стани керованого об'єкта, генерує керуючий вплив у разі виявлення розбіжностей. Зазначений вплив формує вектор адаптації, що ідентифікує характеристики об'єкта, які зазнали деградації або змін. Тобто параметрична оптимізація здійснюється в контексті зміни параметрів уже наявної структури об'єкта для досягнення максимальної продуктивності без зміни його архітектури.

Неможливість відновлення оптимального режиму експлуатації об'єкта засобами параметричної оптимізації свідчить про доцільність застосування структурної оптимізації або реконструкції. В цьому контексті, структурна оптимізація – це процес удосконалення архітектури, компонентів і взаємозв'язків об'єкта для підвищення його ефективності, масштабованості та надійності. Досить часто структурна оптимізація реалізується шляхом рахунок зміни топологічної структури об'єкта (додавання/вилучення нових вузлів, зміни маршрутів між вузлами, зміна місць розташування вузлів тощо).

Класичний підхід до розв'язання задачі оптимізації, який являє собою лінійну послідовність етапів (рис. 2).

Форма цільової функції та характер обмежень визначають лінійний або нелінійний характер оптимізаційної задачі. Зважаючи на те, що більшість задач оптимізації в галузі інформаційних технологій і телекомунікацій мають нелінійну природу (в деяких ситуаціях є можливість їх зведення до лінійної форми), для їх вирішення доцільно застосовувати методи нелінійної оптимізації. Серед відомих підходів до розв'язання нелінійних оптимізаційних задач виділяють [3, 4]:

- метод штрафних функцій (Penalty Function Method).
- метод проєкції градієнта (Projected Gradient Method).
- метод внутрішньої точки (Interior Point Method).
- метод Парето.
- метод гілок та границь (Branch and Bound).

Сьогодні, для розв'язання задач оптимізації широко застосовуються так звані природні алгоритми, серед яких дуже популярним є генетичний алгоритм.

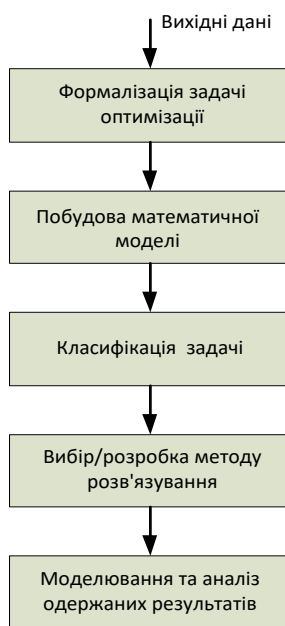


Рис. 2. Алгоритм рішення оптимізаційної задачі

Відповідно до наведеного вище визначення, сервісна платформа надає певний набір послуг користувачам і її оптимізація зводиться до покращення ефективності використання ресурсів, зменшення часу відгуку, підвищення пропускну здатності або мінімізації операційних витрат тощо. Генетичні алгоритми ідеально підходять для таких задач, оскільки вони є евристичними методами глобальної оптимізації, здатними працювати з великими, нелінійними та дискретними просторами пошуку, де традиційні аналітичні методи можуть бути неефективними або занадто складними.

Формування цілей статті

Метою роботи є: розробка та валідація математичної моделі структурної оптимізації топології сервісних платформ на базі радіотехнологій з урахуванням внутрішньосистемних завад. Запропонований підхід, що базується на генетичному алгоритмі, спрямований на підвищення ефективності та надійності функціонування цих платформ.

Виклад основного матеріалу

Функціонування генетичного алгоритму, як і будь-якого іншого алгоритмічного підходу, базується на певних засадах та застосуванні характерних операцій. Автор ідеї використання генетичного алгоритму та його послідовники визначили наступні умовні позначки: у генетичному алгоритмі рішення називають індивідуумом, який має певний набір параметрів, які називаються хромосомою, множина рішень – популяція, ітерації алгоритму – поколіннями. Для переходу на наступну ітерацію до поточної популяції застосовуються базові генетичні операції [5-8]: відбір, схрещування та мутація. Серед важливих компонентів генетичного алгоритму слід виділити й операції генерації популяції та визначення функції придатності (яку часто називають фітнес-функцією). Окрім цього, й інтегровано процедуру верифікації умови завершення алгоритму. Принципову схему функціонування генетичного алгоритму ілюструє рис. 3.

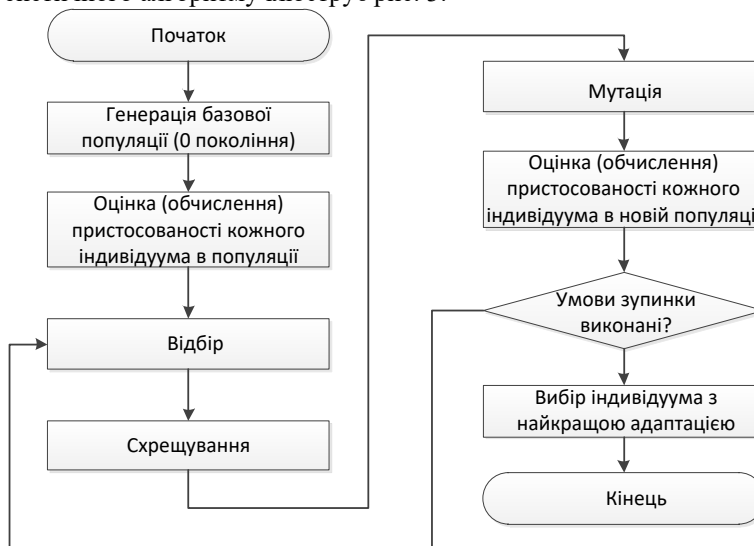


Рис. 3. Базова схема роботи генетичного алгоритму

Першим етапом є генерація вихідної популяції. Ключовою особливістю цього процесу є випадковий характер формування початкової популяції, що забезпечує представлення різноманітних потенційних рішень (індивідів). У контексті генетичних алгоритмів ці індивіди кодується у вигляді хромосом, отже, вихідна популяція становить сукупність таких хромосом. Формат хромосом має відповідати специфічним вимогам розв'язуваної задачі, наприклад, вони можуть бути представлені у вигляді бінарних послідовностей заданої довжини. Випадковість генерації початкової популяції сприяє забезпеченню генетичного різноманіття та розширює простір пошуку для виявлення оптимальних рішень.

Далі необхідно формалізувати функцію придатності. Обчислення функції придатності виконуються ітераційно: на початку для сформованої початкової популяції, а згодом — для кожного наступного покоління після застосування генетичних операторів відбору, схрещування та мутації. Завдяки незалежності придатності кожного індивіда, ці обчислення можна здійснювати паралельно. Після генерації базової популяції до неї застосовуються генетичні оператори, результатом чого є формування нового покоління, що складається з найбільш пристосованих індивідів. Оператор відбору відіграє ключову роль у виборі індивідів з поточної популяції, забезпечуючи перевагу для особин з вищою придатністю. Тип оператора відбору може адаптуватися відповідно до характеристик задачі, зокрема, розміру популяції.

Генетична операція схрещування (рекомбінації) забезпечує формування нащадків із генетичного матеріалу обраних батьківських індивідуумів. Цей процес, як правило, передбачає обмін сегментами хромосом між двома індивідуумами, внаслідок чого утворюються дві нові хромосоми, що представляють наступне покоління.

Мутація є критично важливою генетичною операцією. Вона ініціює випадкові модифікації в одному або кількох генах хромосоми новостворених індивідуумів, забезпечуючи таким чином генерацію нових векторів еволюції. Оператор мутації сприяє відкриттю нових комбінацій генетичного матеріалу, що потенційно призводить до виникнення адаптивних властивостей у нащадків. Це уможливорює еволюцію популяції в напрямку більшої пристосованості до умов середовища, а в контексті оптимізаційних задач — запобігає передчасній збіжності до локальних екстремумів.

Застосування генетичних операторів селекції (відбору), кросовера (схрещування) та мутації формують нове покоління популяції, для індивідів якої повторно обчислюється функція придатності. Наступним етапом є перевірка умов зупинки алгоритму. Як було зазначено раніше, існує низка критеріїв, при досягненні яких ітераційний процес генетичного алгоритму припиняється. До найбільш поширених умов зупинки належать:

- досягнення заданої максимальної кількості поколінь;
- відсутність значних покращень цільової функції протягом кількох послідовних поколінь.

Додаткові критерії зупинки можуть включати:

- Вичерпання встановленого часового обмеження.
- Перевищення встановленого ліміту обчислювальних ресурсів.
- Досягнення ситуації, коли частка популяції, зайнята найкращим рішенням, перевищує визначений пороговий рівень.

Гнучкість у налаштуванні цих умов зупинки дозволяє адаптувати роботу алгоритму до специфічних вимог задачі або системних обмежень. Варто зазначити, що кожен з операторів генетичного алгоритму може бути реалізований за допомогою різних правил, що забезпечує високу адаптивність до широкого спектра оптимізаційних задач у різноманітних галузях.

Формалізація задачі оптимізації

Як було зазначено вище, ключовим компонентом сервісної платформи є множина інформаційних та телекомунікаційних технологій і ресурсів. В сучасних умовах, одним з ключових наборів технологій, який входить до складу сервісної платформи є стек радіотехнологій (5G, LTE, WI-FI6 тощо). Сучасні радіотехнології дозволяють створювати високопродуктивні, масштабовані сервісні платформи здатні формувати широкий спектр мережевих сервісів високої якості та одночасну обслуговувати велику кількість користувачів. Технології 5G та WI-FI6 є основою для таких сервісних платформ як телемедицина, «Розумне місто», «Розумні речі» тощо.

Очевидно, що сервісні платформи на базі радіотехнологій функціонують в умовах зовнішнього середовища, що постійно та динамічно змінюється (постійно змінюється кількість користувачів, їх вимоги до швидкості передачі тощо). Динамічні зміни зовнішнього середовища чинять суттєвий вплив на функціональні характеристики, архітектуру та траєкторію функціонування сервісних платформ, що базуються на радіотехнологіях.. Зрозуміло, що в таких умовах, актуальною задачею є оптимізації розташування базових станцій сервісної платформи розгорнутої на базі радіотехнології, тобто необхідно здійснити оптимізацію топологічної структури платформи на базі радіомережі.

Задача оптимізації розташування БС сервісної платформи на базі безпроводової радіомережі є складним багатофакторним завданням, що вимагає комплексного аналізу та врахування численних критеріїв, включаючи покриття, пропускну здатність, вартість, енергоефективність тощо. Розв'язання цієї задачі дозволить провести топологічну (структурну) оптимізацію мережі та забезпечити рівномірне покриття, уникнути перевантаження та гарантувати користувачам якісний сервіс.

Зазначена задача є досить відомою і для її розв'язання застосовують різні підходи та методи. Так в [9] запропоновано підхід до планування оптимального розташування базових станцій 5G на основі традиційної технології та технології диференціальної еволюції з врахуванням таких факторів як швидкість обміну, точність планування та глибина планування. В [10] для рішення цієї задачі, в умовах гетерогенної структури мережі, запропоновано евристичне рішення на базі генетичного алгоритму. В [11] розв'язана задача оптимального розташування базових станцій на відкритій місцевості. Рішення ґрунтується на базі генетичного алгоритму та враховує такі фактори, як вартість монтажу БС, евклідова відстань між БС, максимізація зони покриття однієї базової станції та гарантована пропускна здатність на одного абонента.

Однак, в розглянутих роботах дослідження проводились для «ідеальних умов», тобто не було враховано фактор наявності внутрішньосистемних завад. Внутрішньосистемні завади, що виникають внаслідок інтерференції між сусідніми БС, а також між терміналами користувачів, є ключовим фактором, що обмежує продуктивність та надійність платформи на базі безпроводових радіотехнологій. Зі збільшенням щільності розгортання БС та щільності абонентів виникає проблема суттєвого погіршення якості послуг. Наявні моделі не враховують вплив внутрішньосистемних завад, у зв'язку з цим, дослідження оптимізації топологічної структури платформи на базі безпроводових радіотехнологій з урахуванням внутрішньосистемних завад є актуальною науковою задачею, розв'язання якої дозволить покращити продуктивність та надійність платформи забезпечити високу якість послуг та оптимізувати використання ресурсів платформи.

Розробка моделі на базі генетичного алгоритму

Вихідні умови задачі можна описати наступним чином: нехай задана площа з розмірами $L_x \times L_y$, де потрібно розмістити N_{bs} базових станцій для надання сервісів N_{ue} користувачів. Також визначено місця розташування i -ї базової станції та j -го користувача:

$$\begin{aligned} b_i &= (x_i^b, y_i^b) \\ u_j &= (x_j^u, y_j^u), \end{aligned} \quad (1)$$

де x_i^b, y_i^b, x_j^u та y_j^u координати розміщення базових станцій та користувачів, відповідно.

В залежності від типу середовища розповсюдження радіохвиль (місто, передмістя, приміщення) враховується відповідна модель поширення радіохвиль, яка дозволяє визначити втрати радіосигналу PL при його розповсюдженні від передавача до приймача. Знаючи рівень втрат радіосигналу PL можна визначити його потужність на вході j -го приймача, що створена i -ю базовою станцією:

$$P_{i,j}(d_{i,j}) = P_t - PL(d_{i,j}), \quad (2)$$

де P_t - потужність передавача, $d_{i,j}$ - евклідова відстань між базовою станцією та приймачем, $d_{i,j} = \|b_i - u_j\|$.

Оптимізація сервісної платформи зазвичай проводиться по одному або декількох параметрам якості обслуговування (QoS). Одним з таких параметрів є пропускна здатність або швидкість передачі даних для кінцевого користувача.

Відомо, що в каналі з завадами теоретична пропускна здатність може бути описана формулою Шеннона:

$$R_j = B \cdot \log_2(1 + SINR), \quad (3)$$

де B - ширина смуги пропускання, $SINR$ - відношення сигнал/завада+шум. Знаючи потужність створювану кожною базовою станцією, це відношення може бути знайдене наступним чином:

$$SINR = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i} P_{k,j} + N_0}, \quad (4)$$

де N_0 - рівень шуму приймача.

В межах задачі структурної оптимізації сервісної платформи вирішується питання визначення найкращого розміщення базових станцій, при якому буде забезпечено максимальне середнє значення відношення сигнал/завада+шум та, відповідно, максимальне середнє значення швидкості передачі даних для кожного користувача сервісної платформи. Тобто має місце структурна оптимізація топології сервісної платформи.

Для розв'язку даної задачі оптимізації топологічної структури скористуємось генетичним алгоритмом.

Формування початкової популяції буде генеруватись наступним чином:

$$\chi = \{(x_1^b, y_1^b), (x_2^b, y_2^b), \dots, (x_{N_{bs}}^b, y_{N_{bs}}^b)\}. \quad (5)$$

Фітнес-функцією є максимізація середньої швидкості користувачів сервісної платформи, тобто у контексті описаної задачі, вона дозволяє оцінити наскільки поточне розміщення базових станцій відповідає цільовим вимогам:

$$F(\chi) = \frac{1}{N_{ue}} \sum_{j=1}^{N_{ue}} R_j. \quad (6)$$

Додатково, для фітнес-функції можуть застосовуватись обмеження або штрафні коефіцієнти, наприклад за малу відстань між сусідніми базовими станціями або перенавантаження БС, коли кількість підключених пристроїв перевищує порогове значення.

Відповідно після формування початкової популяції проводиться розрахунок фітнес-функції та її порівняння з умовами зупинки алгоритму. Якщо умова не досягнута то застосовуються операції відбору, схрещування та мутації для формування наступного покоління. Далі ітерації повторюються, доки не буде виконано умова зупинки алгоритму.

Завершення генетичного алгоритму виконується при виконанні однієї або декілька умов, до яких відносяться: досягнення максимального числа поколінь (ітерацій), стабілізація значень фітнес-функції або відсутність покращення параметрів оптимізації після декількох поколінь.

Результати дослідження

Для оцінки ефективності генетичного алгоритму проведемо експеримент – змодельємо роботу сервісної платформи в умовах торговельного центру. Розмір території що обслуговується 100 на 100 метрів, потенційна кількість користувачів послуг сервісної платформи – 200 активних користувачів. Модель розміщення користувачів на площі – рівномірне розподілення методом Монте-Карло. Початкова кількість базових станцій - 10. Застосувавши описану вище модель та алгоритм було отримано результати оптимізації, які наведені на рис. 4 та 5.

Рисунки 4а та 4б демонструють початкове випадкове розміщення 10 базових станцій та їх оптимізоване розміщення після застосування генетичного алгоритму. Як видно у цьому варіанті базові станції стали розташовані більш рівномірно, що суттєво зменшило області з поганим покриттям та дозволило ефективніше врахувати просторову щільність користувачів.

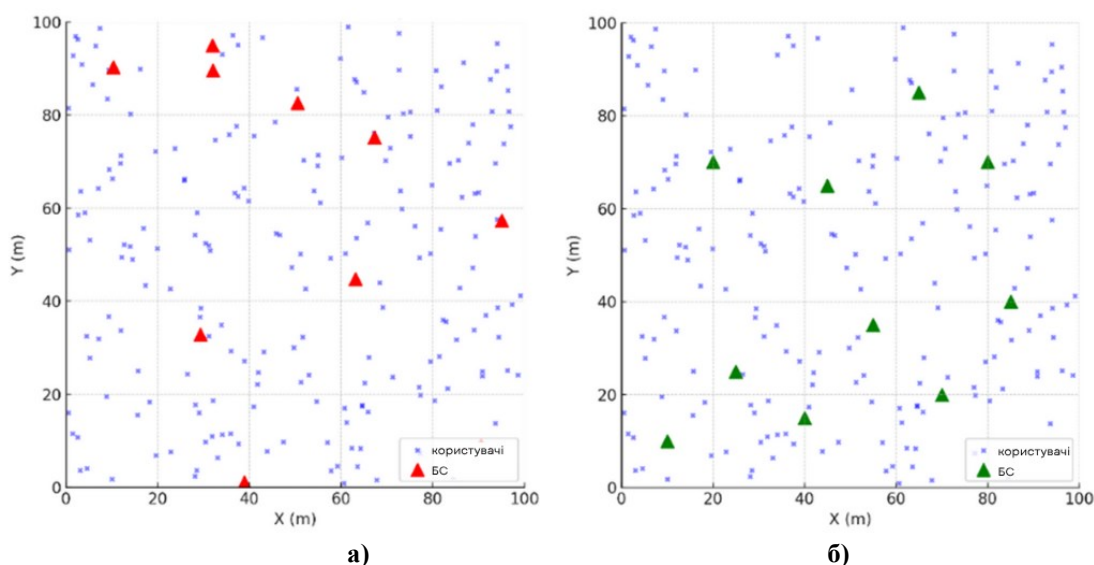


Рис. 4. Оптимізація розміщення БС: а) початкове розміщення, б) оптимізоване розміщення

Також, під час оптимізації топологічної структури було враховано вплив внутрішньосистемних завад. Покращення показника SINR безпосередньо впливає на якість обслуговування користувачів, зокрема на досягну швидкість передачі даних. Рисунки 5а та 5б демонструють теплові карти оцінених швидкостей передачі даних користувачів (у Мбіт/с) до та після оптимізації відповідно.

Очевидно, що після оптимізації значна частина області досягає вищих швидкостей передачі даних, тоді як зони з низькою пропускну здатністю були суттєво зменшені.

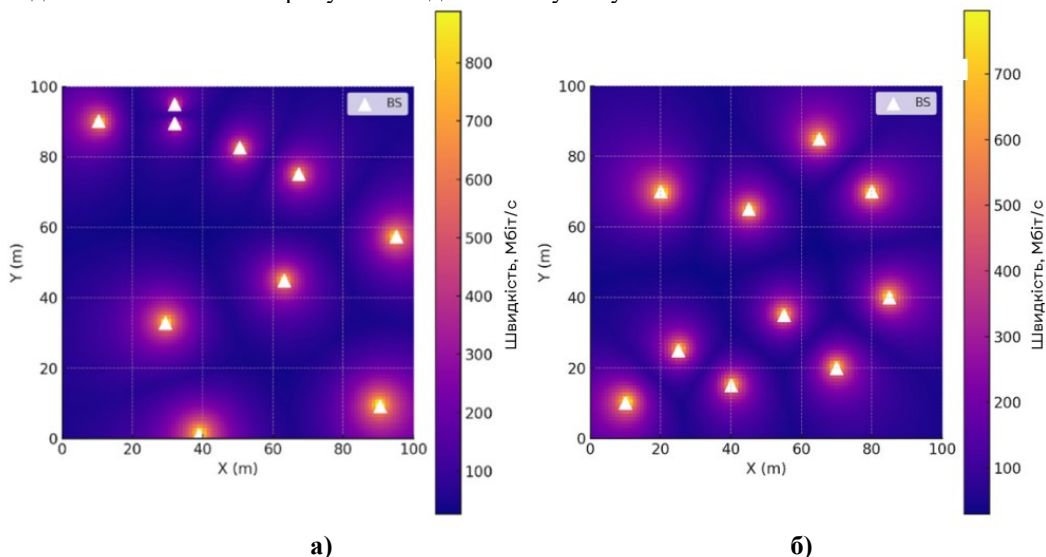


Рис. 5. Теплова карта швидкості БС: а) до оптимізації, б) після оптимізації

Отримані результати експерименту демонструють, що оптимізація топологічної структури сервісної платформи на базі генетичного алгоритму дозволила підвищити якість сервісів та забезпечити усім користувачам гарантовану швидкість на рівні 100 Мбіт/с.

Висновки

У роботі досліджено питання оптимізації сучасних сервісних платформ, проведено аналіз наявних методів оптимізації та обґрунтовано доцільність застосування генетичних алгоритмів, які ефективно долають обмеження класичних підходів при роботі зі складними, нелінійними та багатофакторними задачами. зокрема запропоновано універсальну математичну модель для структурної. Ключовим результатом є розробка універсальної математичної моделі для структурної оптимізації сервісних платформ на базі безпроводових радіотехнологій (наприклад, LTE, 5G, WI-FI тощо), яка враховує вплив внутрішньосистемних завад. Ця модель дозволяє оцінювати та максимізувати середню швидкість передачі даних для користувачів, враховуючи такі критичні параметри, як положення базових станцій, інтенсивність сигналу, показник SINR та інтерференції.

Працездатність та ефективність запропонованої моделі були успішно продемонстровані на практичному прикладі оптимізації базових станцій сервісної платформи, яка функціонує у приміщенні торговельного центру. Експеримент показав, що застосування генетичного алгоритму дозволяє значно покращити рівномірність покриття, зменшити зони з низькою пропускну здатністю та оптимізувати використання ресурсів платформи тобто отримати оптимальну топологічну структуру сервісної платформи.

Таким чином, запропонована модель є ефективним інструментом для підвищення продуктивності та надійності сервісних платформ на базі безпроводових радіотехнологій. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на програмну реалізацію цієї методики та її адаптацію до інших типів сервісних платформ.

Література

1. Nikityuk, L. A. Method for Constructing an Adaptive Model for Optimizing Service Platforms of Information and Communication Networks / L. A. Nikityuk, R. Y. Tsaryov // Infocommunications–Present and Future : International Conference. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 256–271. – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5>.
2. Величко, О. М. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень / О. М. Величко, Т. Б. Гордієнко. – Херсон : Олді+, 2021. – 672 с.
3. Ullman, J. D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation / J. D. Ullman, R. Motwani, J. E. Hopcroft. – 3rd ed. – London : Pearson, 2006.
4. Фельдман, Л. П. Чисельні методи в інформатиці : навчальний посібник / Л. П. Фельдман. – К. : Видавнича група BHV, 2009. – 479 с.
5. Mitchell, M. An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. – Cambridge : MIT press, 1998.
6. Holland, J. Genetic algorithms, computer programs that evolve in ways that even their creators do not fully understand / J. Holland // Scientific American. – 1975. – P. 66–72.
7. Srinivas, M. Genetic algorithms: A survey / M. Srinivas, L. M. Patnaik // Computer. – 1994. – Vol. 27, no. 6. – P. 17–26.
8. Man, K.-F. Genetic algorithms: concepts and applications / K.-F. Man, K.-S. Tang, S. Kwong // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Vol. 43, no. 5. – P. 519–534.
9. Energy efficient base station location optimization for green B5G networks / R. Sachan [et al.] // Proceedings of Second International Conference on Communication, Computing and Networking. – Singapore : Springer, 2022. – (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 453). – P. 441–448.
10. Ren, H. Vehicle routing optimization of logistics distribution based on genetic algorithm (VRPTW) / H. Ren // Frontiers in Economics and Management. – 2022. – Vol. 3, no. 1. – P. 294–299.
11. Chen, G. Research and Implementation of 5G Base Station Location Optimization Problem Based on Genetic Algorithm / G. Chen, X. Wang, G. Yang // Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Intelligent Technologies (ICAIT 2023). — Cham : Springer, 2023. – (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 779). – P. 372–379.

References

1. Nikityuk, L. A. Method for Constructing an Adaptive Model for Optimizing Service Platforms of Information and Communication Networks / L. A. Nikityuk, R. Y. Tsaryov // Infocommunications–Present and Future : International Conference. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 256–271. – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5>.
2. Velychko, O. M. Osnovy systemnoho analizu i pryiniattia optymalnykh rishen / O. M. Velychko, T. B. Hordiienko. – Kherson : Oldi+, 2021. – 672 s.
3. Ullman, J. D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation / J. D. Ullman, R. Motwani, J. E. Hopcroft. – 3rd ed. – London : Pearson, 2006.
4. Feldman, L. P. Chyselni metody v informatytsi : navchalnyi posibnyk / L. P. Feldman. – K. : Vydavnycha hrupa BHV, 2009. – 479 s.
5. Mitchell, M. An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. – Cambridge : MIT press, 1998.
6. Holland, J. Genetic algorithms, computer programs that evolve in ways that even their creators do not fully understand / J.

Holland // Scientific American. – 1975. – P. 66–72.

7. Srinivas, M. Genetic algorithms: A survey / M. Srinivas, L. M. Patnaik // Computer. – 1994. – Vol. 27, no. 6. – P. 17–26.

8. Man, K.-F. Genetic algorithms: concepts and applications / K.-F. Man, K.-S. Tang, S. Kwong // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Vol. 43, no. 5. – P. 519–534.

9. Energy efficient base station location optimization for green B5G networks / R. Sachan [et al.] // Proceedings of Second International Conference on Communication, Computing and Networking. – Singapore : Springer, 2022. – (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 453). – P. 441–448.

10. Ren, H. Vehicle routing optimization of logistics distribution based on genetic algorithm (VRPTW) / H. Ren // Frontiers in Economics and Management. – 2022. – Vol. 3, no. 1. – P. 294–299.

11. Chen, G. Research and Implementation of 5G Base Station Location Optimization Problem Based on Genetic Algorithm / G. Chen, X. Wang, G. Yang // Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Intelligent Technologies (ICAIT 2023). — Cham : Springer, 2023. – (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 779). – P. 372–379.