УДК 004.02 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.28

Н. О. СОЛОДКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних систем
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-7545-4969

О. В. ТРОЩИЛО
аспірант кафедри інформаційних систем
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0009-0004-6119-0220

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Розвиток мобільних мереж є важливим напрямком наукових досліджень та технічного вдосконалення. Зростаюча кількість користувачів і необхідність якісного покриття створюють виклики для операторів зв'язку. Оптимальне проєктування базових станцій є ключовим аспектом ефективності мереж, адже дозволяє забезпечити максимальне покриття за мінімальних витрат. Визначення оптимального розташування базових станцій впливає на якість зв'язку, рівень завад, фінансові витрати та загальну продуктивність мережі.

У статті досліджено підходи до оптимального проєктування базових станцій мобільних мереж із використанням математичних моделей та сучасних алгоритмів. Розглянуто методи оптимізації, такі як лінійне програмування з цілочисловими змінними, жадібні алгоритми, генетичні алгоритми та метод симуляції відпалу. Проаналізовано їх ефективність у задачах покриття території та економічні аспекти проєктування.

Розроблено підхід, що враховує основні фінансові фактори, включаючи вартість обладнання, монтажу, експлуатації та обслуговування. Запропоновані методи дозволяють мінімізувати витрати, підвищити продуктивність мережі й забезпечити високу якість обслуговування користувачів мобільного зв'язку.

Отримані результати можуть бути використані для планування мобільних мереж різного масштабу, підвищення ефективності використання ресурсів і зменшення витрат на розгортання інфраструктури. Запропоновані рекомендації сприятимуть вдосконаленню проєктування базових станцій для забезпечення надійного, стабільного та доступного зв'язку у майбутньому.

Ключові слова: *мобільні мережі, базові станції, оптимізація, бездротовий зв'язок, математичне моделювання, алгоритми оптимізації, покриття території, економічна ефективність, генетичні алгоритми, симуляція відпалу, лінійне програмування, інфраструктура зв'язку, витрати на розгортання, якість зв'язку, комунікаційні технології.*

N. O. SOLODKA
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Information Systems Department
Ukrainian State University of Science and Technologys
ORCID: 0000-0002-7545-4969

O. V. TROSHCHYLO
Postgraduate Student at the Information Systems Department
Ukrainian State University of Science and Technologys
ORCID: 0009-0004-6119-0220

OPTIMAL DESIGN OF MOBILE NETWORK BASE STATIONS

The development of mobile networks is a crucial area of scientific research and technological advancement. The increasing number of mobile communication users and the demand for high-quality coverage pose significant challenges for network operators. Optimal base station design is a key aspect of network efficiency, as it ensures maximum coverage with minimal costs. The placement of base stations significantly impacts connection quality, interference levels, financial expenses, and overall network performance.

This paper examines approaches to optimal base station placement in mobile networks using mathematical models and modern optimization algorithms. The study reviews optimization methods such as integer linear programming, greedy algorithms, genetic algorithms, and the simulated annealing method. The advantages and disadvantages of each approach, as well as their effectiveness in coverage optimization tasks, are analyzed.

A methodology is developed that considers key financial factors, including equipment costs, installation, operation, and maintenance expenses. The proposed methods help minimize costs, enhance network performance, and ensure high-quality mobile service for users.

The obtained results can be applied to the planning of mobile networks of various scales, improving resource utilization efficiency and reducing infrastructure deployment costs. The proposed recommendations contribute to refining base station design to provide reliable, stable, and accessible communication in the future.

Key words: *mobile networks, base stations, optimization, wireless communication, mathematical modeling, optimization algorithms, coverage area, economic efficiency, genetic algorithms, simulated annealing, linear programming, communication infrastructure, deployment costs, connection quality, communication technologies.*

Постановка проблеми

У сучасному світі розвиток мобільних мереж є важливою складовою науково-технічного прогресу. Постійне зростання кількості користувачів мобільного зв'язку та потреба у високоякісному покритті створюють нові виклики для операторів мобільних мереж. Збільшення навантаження на існуючу інфраструктуру призводить до необхідності удосконалення системи розміщення базових станцій [1], щоб забезпечити максимальне покриття при мінімальних фінансових витратах.

Одним із головних завдань оптимального проєктування мобільних мереж є вибір місць для встановлення базових станцій, який має значний вплив на якість зв'язку, рівень завад та загальні витрати на розгортання інфраструктури. Традиційні методи розміщення базових станцій базуються на емпіричних моделях та простих алгоритмах [2, 3], проте вони не завжди дають змогу досягти найкращого балансу між якістю обслуговування та витратами.

Сучасні підходи до оптимізації мобільних мереж включають використання математичних моделей та алгоритмів штучного інтелекту [4], що дозволяють знаходити ефективні рішення з урахуванням технологічних, економічних та географічних обмежень. Однак, існує проблема вибору найкращого алгоритму оптимізації, що здатен забезпечити необхідний рівень якості покриття мобільного зв'язку.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки ефективних методів оптимального проєктування базових станцій мобільних мереж, що дозволяють мінімізувати витрати та забезпечити високий рівень зв'язку [5]. Дослідження спрямоване на аналіз існуючих підходів, їх порівняльну характеристику та розробку практичних рекомендацій щодо покращення мобільних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оптимізація розміщення базових станцій мобільних мереж є предметом досліджень багатьох науковців. У сучасних роботах приділяється значна увага математичним методам та алгоритмам штучного інтелекту для визначення оптимального розташування станцій. Зокрема, у дослідженні [2] розглядається використання математичного програмування для вирішення задач розміщення базових станцій. Аналогічно, в роботі автори [5] пропонують використання методів опуклої оптимізації для підвищення ефективності планування мобільних мереж.

Дослідження [6] аналізує сучасні стратегії проєктування мобільних мереж, наголошуючи на важливості збалансованого підходу до планування інфраструктури. Водночас, в [7] представлено нові методи оптимізації, що використовують евристичні підходи для розташування базових станцій з урахуванням територіальних обмежень.

Значну увагу приділено застосуванню машинного навчання для розв'язання задач оптимізації мобільних мереж. Зокрема, у роботі [8] розглядаються алгоритми глибокого навчання для прогнозування ефективності розташування базових станцій; в роботі [4] досліджено можливості використання штучного інтелекту для автоматизованого налаштування мережевих параметрів.

Таким чином, аналіз наукових досліджень демонструє, що існує широкий спектр методів для оптимізації розміщення базових станцій мобільних мереж. Використання математичних моделей, алгоритмів штучного інтелекту та евристичних методів дає змогу підвищити ефективність проєктування мереж, зменшити витрати та забезпечити якісне покриття територій.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка ефективних методів оптимізації розміщення базових станцій мобільних мереж, що забезпечують мінімізацію витрат на їх розгортання, максимізацію покриття території та покращення якості мобільного зв'язку. Дослідження спрямоване на порівняльний аналіз існуючих методів оптимізації, визначення їх переваг і недоліків, а також розробку підходу, що дозволяє інтегрувати сучасні математичні методи та алгоритми машинного навчання для вдосконалення мобільних мереж.

Основні завдання дослідження: аналіз існуючих підходів до розміщення базових станцій та їх оптимізації; визначення ключових факторів, що впливають на ефективність мобільних мереж; розробка математичних моделей та алгоритмів оптимізації розташування базових станцій; оцінка економічної ефективності запропонованих методів; проведення експериментальних досліджень та перевірка ефективності запропонованих рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Актуальність теми обумовлена постійним зростанням кількості абонентів, яке в свою чергу призводить до значних фінансових витрат. Також, для вирішення задачі використовується оптимізація, як сучасний і ефективний інструмент.

Головною метою є покриття вказаної місцевості базовими станціями мобільного зв`язку. При цьому необхідно знайти координати нових станцій з урахуванням відстаней між існуючими та новими станціями, яке забезпечить повне покриття місцевості і зробить його максимально рівномірним. Крім того, повинна бути врахована вартість встановлення кожної нової станції, і зведена до мінімуму [6].

Задача формулюється як система квадратичних рівнянь, або квадратична оптимізаційна задача. Оптимізація охоплення описується формулами, які мінімізують кількість нових базових станцій [5]:

$$\min \sum_{i,j} \left\| x_i - x_j \right\|^2, \quad i = 1, \ldots, m, \quad j = 1, \ldots, k.$$

Координати нових станцій визначаються через булеві змінні z, які враховують можливі місця встановлення. Така модель дозволяє мінімізувати кількість базових станцій, що задовольняють заданим умовам, та визначити мінімальний кошторис.

Основні компоненти моделі, розділені на категорії:

Вхідні параметри:

m – кількість існуючих базових станцій,

k – кількість потенційних місць для розташування нових станцій,

x_i – координати i-ї існуючої станції,

d_{ij} – відстань між і-ю існуючою станцією та j-ю новою станцією,

C_j – вартість встановлення базової станції в місці j.

Змінні:

z_j – булева змінна яка визначає, чи встановлюється базова станція в місці j, або ні (приймає значення 1 або 0 відповідно).

Цільовою функцією є мінімізація загальних витрат на встановлення базових станцій:

$$\min \sum_{j-1}^{k} C_j z_j.$$

Вказана функція забезпечує мінімізацію кількості нових базових станцій із врахуванням їх вартості.

Для забезпечення покриття території кожна точка (або станція) повинна бути в зоні дії хоча б однієї базової станції, тобто утворювати мережу, в якій будь-яка станція має прямий або непрямий зв`язок з будь-якою іншою:

$$\sum_{j-1}^{k} z_j \cdot h(d_{ij}) \geq 1, \ \forall i \in \{1, \ldots, m\},$$

де $h(d_{ij})$ – функція, що визначає, чи покривається точка i-тою базовою станцією (наприклад, $h(d_{ij}) = 1$, якщо $d_{ij} \leq R$, де R – радіус дії станції).

Також, необхідно врахувати певне обмеження на кількість станцій, тому що не всі потенційні місця можуть використовуватися:

$$\sum_{j-1}^{k} z_j \leq k_{\max},$$

де $k_{\max}$ – максимальна кількість базових станцій, які можна встановити.

Також маємо булеві змінні $z_j \in \{0, 1\}, \forall j \in \{1, \ldots, k\}$.

Для розв`язання задачі можливо використання методів комбінаторної оптимізації, таких як лінійне програмування з цілочисловими змінними (для фактичної реалізації існують стандартні оптимізаційні інструменти, наприклад PuLP для Python [6]; жадібний алгоритм, здатний шукати найближчі точки покриття, поступово додаючи станції; методи евристики, такі як генетичні алгоритми або симуляція відпалу для пошуку близького до оптимального рішення [7].

Лінійне програмування з цілочисловими змінними (Integer Linear Programming, ILP) – це метод оптимізації, у якому змінні можуть приймати лише цілі значення (наприклад, 0 або 1).

У випадку оптимального проєктування базових станцій мобільних мереж ILP використовується для: вибору оптимальних місць для розміщення базових станцій; мінімізації витрат на будівництво при забезпеченні повного покриття, гарантії, що кожна точка в мережі покрита хоча б однією станцією.

Жадібний алгоритм (Greedy Algorithm) – це алгоритм оптимізації, який приймає локально оптимальні рішення на кожному кроці, сподіваючись, що це призведе до глобально оптимального рішення.

Принцип роботи: на кожному кроці обирається найкраще можливе рішення, без врахування майбутніх наслідків. Жадібні алгоритми зазвичай працюють швидко, тому що не розглядають усі можливі комбінації. Однак вони не завжди дають оптимальний результат, особливо в складних задачах.

У задачах оптимізації, де класичні методи (як лінійне програмування) можуть працювати повільно або не давати точного рішення, використовують евристичні методи. Два популярних підходи: генетичні алгоритми (GA – Genetic Algorithms) та симуляція відпалу (SA – Simulated Annealing). Ці методи дозволяють знаходити наближене оптимальне рішення для складних задач, таких як розміщення базових станцій мобільних мереж [7]. Генетичні алгоритми імітують природний добір, де найкращі рішення «еволюціонують» з кожним поколінням [9]. Алгоритм має кілька основних етапів: генерація початкової популяції, в процесі якої створюється набір випадкових рішень (наприклад, розміщення базових станцій); оцінка (fitness function): кожне рішення оцінюється за критерієм, наприклад, мінімізація витрат на встановлення станцій, та/або максимальне покриття території; далі алгоритм вибирає найефективніші рішення, які йдуть у наступне покоління; схрещування (crossover) – це процес в якому обирається два хороших рішення та комбінуються, створюючи нові рішення; мутація (mutation) – випадково змінюємо частини рішення, щоб уникнути застрягання в локальному мінімумі (теоретично, цей крок можна інколи пропускати); в подальшому кроки повторюються, поки не буде знайдено оптимальне або майже оптимальне рішення.

Симуляція відпалу (Simulated Annealing, SA) – це алгоритм, який працює за аналогією із процесом охолодження металу: спочатку система має високу «температуру», тому може робити великі зміни в пошуку рішення; потім температура поступово знижується, і система стабілізується на оптимальному рішенні. Покроково це виглядає наступним чином: початковий стан – випадкове розміщення станцій; вибір сусіднього стану – робимо невелику зміну (наприклад, змінюємо розташування однієї станції); обчислення енергії (оцінка якості рішення) – якщо нове рішення краще, приймаємо його; ймовірність прийняття гіршого рішення – інколи приймаємо погані рішення, щоб уникнути локального мінімуму; поступове зниження температури – чим нижча температура, тим менше змін.

В якості практичної частини дослідження було створено програму на Python, яка вирішує спрощену оптимізаційну задачу з трьома існуючими станціями, і п’ятьма потенційними місцями для нових станцій. Радіус дії кожної станції є відомим і однаковим для всіх існуючих і нових станцій. При розробці програми використовувався метод лінійного програмування. По результатах обчислень вдалося досягти мінімальної кількості нових станцій для покриття всіх точок (з 5 можливих вистачило 3), також враховані обмеження на кількість і вартість станцій. При розробці програми використовувався метод лінійного програмування. Це пов’язано з невеликим обсягом даних. Теоретично, при суттєвому підвищенні кількості даних (наприклад, кількості станцій, або додаванню додаткових параметрів) лінійне програмування не буде здатне впоратися з задачею, а, відповідно, виникне необхідність застосування жадібного алгоритму або генетичних алгоритмів. Взагалі, використання генетичного алгоритму мало б універсальний характер, тобто така програма зможе впоратися з обчисленням легких, середньої складності, та складних задач. Проте, саме під легкі задачі використання генетичних алгоритмів не є доцільним, виходячи з низької швидкодії і складності програмної реалізації.

Висновки

У ході дослідження було проаналізовано сучасні підходи до оптимізації розміщення базових станцій мобільних мереж. Визначено, що математичне програмування, алгоритми машинного навчання та евристичні методи є найперспективнішими інструментами для вирішення цієї задачі. Серед розглянутих підходів особливу увагу приділено методам лінійного програмування, жадібним алгоритмам, генетичним алгоритмам і методу симуляції відпалу. Аналіз показав, що кожен із цих методів має свої переваги та обмеження залежно від параметрів задачі та масштабів розгортання мережі.

Здійснений аналіз продемонстрував, що оптимальне розташування базових станцій дозволяє не лише підвищити якість зв’язку та рівномірність покриття, але й значно зменшити фінансові витрати на розгортання інфраструктури. Впровадження сучасних підходів до оптимізації дозволяє операторам мобільного зв’язку підвищити ефективність використання мережевих ресурсів та покращити обслуговування користувачів. Зокрема, використання методів комбінаторної оптимізації дозволяє скоротити кількість необхідних базових станцій при збереженні якісного покриття території. Генетичні алгоритми та методи симуляції відпалу показують високий потенціал у вирішенні складних багатофакторних задач розміщення.

Практичне застосування запропонованих підходів підтвердило ефективність розробленої математичної моделі та алгоритмів. Використання лінійного програмування дозволило знайти оптимальну конфігурацію розташування базових станцій, що забезпечує мінімальні витрати на розгортання мережі. Було продемонстровано, що застосування евристичних алгоритмів є доцільним для великих мереж із великою кількістю параметрів і змінних.

Отримані результати можуть бути використані для планування мобільних мереж різного масштабу, що дозволить підвищити ефективність використання ресурсів і зменшити витрати на розгортання інфраструктури. Запропоновані рекомендації сприятимуть вдосконаленню проєктування базових станцій для забезпечення надійного, стабільного та доступного зв’язку у майбутньому. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку гібридних алгоритмів, що поєднують переваги різних методів оптимізації для ще більш ефективного планування мобільних мереж. Крім того, перспективним напрямком є дослідження впливу змінних параметрів навколишнього середовища на результати оптимізації та розробка адаптивних алгоритмів, які можуть самостійно налаштовуватися під змінні умови експлуатації.

Список використаної літератури

1. Chen, X., & Yang, H. Optimization Methods for Wireless Networks. Springer, 2018. С. 5–8.
2. Fischetti, M., & Ljubić, I. Optimal Location of Wireless Facilities: A Mathematical Programming Approach, 2017. С. 12.
3. Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. Linear Programming and Network Flows. John Wiley & Sons, 2010. С. 121–127.
4. Ahmed, S., & Khan, M. Artificial Intelligence in Network Optimization. Elsevier, 2023. С. 34–35.
5. Boyd, S., & Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004. С. 314–318.
6. Wang, J., & Li, X. Modern Wireless Network Planning: Strategies and Tools. Wiley, 2019. С. 56–57.
7. Zhou, P., & Huang, Y. Advanced Network Optimization Techniques. CRC Press, 2020. С. 14.
8. Kumar, A., & Singh, R. Machine Learning Applications in Wireless Networks. Elsevier, 2021. С. 121.
9. Li, H., & Zhao, L. Emerging Trends in Wireless Communication Systems. Springer, 2022. С. 4–5.
10. Косолап, А. І. Оптимізація спеціалізованих комп'ютерних систем. Дніпро : УДХТУ, 2020. С. 21–26.
11. Косолап, А. І. Методи та моделі оптимізації комп'ютерних систем. Дніпро : УДХТУ, 2021. С. 45–47.

References

1. Chen, X., & Yang, H. (2018). *Optimization methods for wireless networks* (pp. 5–8). Springer.
2. Fischetti, M., & Ljubić, I. (2017). *Optimal location of wireless facilities: A mathematical programming approach* (p. 12).
3. Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2010). *Linear programming and network flows* (pp. 121–127). John Wiley & Sons.
4. Ahmed, S., & Khan, M. (2023). *Artificial intelligence in network optimization* (pp. 34–35). Elsevier.
5. Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization* (pp. 314–318). Cambridge University Press.
6. Wang, J., & Li, X. (2019). *Modern wireless network planning: Strategies and tools* (pp. 56–57). Wiley.
7. Zhou, P., & Huang, Y. (2020). *Advanced network optimization techniques* (p. 14). CRC Press.
8. Kumar, A., & Singh, R. (2021). *Machine learning applications in wireless networks* (p. 121). Elsevier.
9. Li, H., & Zhao, L. (2022). *Emerging trends in wireless communication systems* (pp. 4–5). Springer.
10. Kosolap, A. I. (2020). *Optimization of specialized computer systems* (pp. 21–26). UDHTU.
11. Kosolap, A. I. (2021). *Methods and models of computer system optimization* (pp. 45–47). UDHTU.