

Оптимізація розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі методом багатокритеріальної мінімізації

Анастасія Кондакова¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037

¹ kondakova_am@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1302-2244>

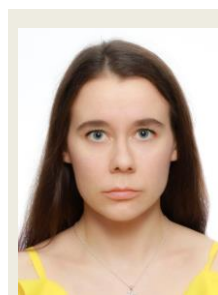
Received 16.10.2025, accepted 11.12.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1204>

Анотація. У статті розглянуто задачу оптимізації просторового розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі на основі багатокритеріальної мінімізації з одночасним урахуванням енергоспоживання, мережевої затримки та щільності покриття. Запропоновано математичну модель, у якій міська територія дискретизується на множину комірок попиту та кандидатних позицій, а вибір активних сенсорів описується бінарним вектором рішень. Цільова функція інтегрує три нормалізовані критерії: загальні енерговитрати, середню затримку доставки даних та відхилення фактичної щільності покриття від цільового профілю. Модель доповнено набором просторових і мережевих обмежень, що визначають зв'язність вузлів, зони покриття та максимально допустиму кількість сенсорів.

Для валідації моделі реалізовано програмний модуль на Python, який автоматизує пошук оптимальних конфігурацій, побудову графа зв'язності, обчислення часткових критеріїв та порівняння оптимізованої топології з традиційним ґратковим розміщенням. Експериментальне оцінювання виконано з використанням реального набору даних IoT Sensor Network Dataset, що містить різні параметри сенсорних мереж і дозволяє зіставити ефективність запропонованого підходу з типовими конфігураціями. Отримані результати продемонстрували суттєве зниження енергоспоживання та середньої затримки передачі, а також покращення просторової повноти покриття при збереженні кількості вузлів. Запропонована модель забезпечує збалансоване оптимізаційне рішення для міських IoT-інфраструктур і може слугувати основою для подальшого розвитку адаптивних методів планування топології в системах «розумного міста».

Ключові слова: IoT-мережі, оптимальне розміщення сенсорів, багатокритеріальна



Анастасія Кондакова

Аспірант кафедри
кібербезпеки та комп'ютерної
інженерії

оптимізація, енергоспоживання, затримка, щільність покриття, міська інфраструктура.

ВСТУП

Стрімкий розвиток міських IoT-інфраструктур у контексті «розумних міст» супроводжується різким зростанням числа сенсорних вузлів, різноманітністю трафіку та складністю урбанізованої геометрії, що робить завдання їх оптимального просторового розміщення критично важливим для забезпечення якості сервісів, енергоефективності та надійності системи. Наявні дослідження переважно зосереджені на оптимізації маршрутизації, виборі кластерних голів чи керуванні ресурсами, однак значно менше уваги приділено саме початковому плануванню топології – етапу, де визначаються фундаментальні властивості мережі: щільність покриття, очікувані затримки, баланс енерговитрат і стійкість до перевантажень.

У міському середовищі, що характеризується нерівномірною забудовою, зонами перешкод і варіативною інтенсивністю інформаційних потоків, відсутність комплексної моделі розміщення сенсорів призводить до локальної деградації QoS, надмірного навантаження на окремі вузли та передчасного вичерпання енергії.

Окремі роботи демонструють ефективність багатокритеріальних методів у специфічних задачах (енергоменеджмент, моніторинг пожеж, планування гібридних мереж), але не пропонують універсальної цільової функції, яка б одночасно враховувала енергію, затримку та щільність покриття для стаціонарних міських IoT-мереж.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою у математично обґрунтованому методі багатокритеріальної оптимізації, здатному формувати топології сенсорних мереж, які забезпечують збалансоване енергоспоживання, мінімальні затримки та повноцінне покриття міського простору. Запропонована в статті цільова функція та метод розміщення сенсорів спрямовані саме на розв'язання цього комплексного завдання, що має як теоретичне, так і прикладне значення для проєктування масштабованих та ефективних IoT-інфраструктур розумного міста.

Сучасні дослідження в галузі міських IoT-мереж демонструють активний розвиток методів багатокритеріальної оптимізації, спрямованих на одночасне врахування енергоспоживання, затримки та якості сенсорного покриття, що формує наукове підґрунтя для запропонованого підходу.

Попри значний прогрес у сфері енергоефективної маршрутизації, кластеризації та динамічної оптимізації ресурсів у міських IoT-мережах, наявні дослідження здебільшого зосереджуються на післятопологічних рішеннях – виборі кластерних голів, управлінні навантаженням, адаптації маршрутів або оптимізації мобільних приймачів. Значно менше уваги приділено початковому етапу – оптимальному розміщенню сенсорних вузлів, який визначає базову якість покриття, очікувані затримки та рівномірність енерговитрат. Сучасні роботи зазвичай враховують лише один або два критерії (енергію, або затримку, або покриття), що не дозволяє отримати збалансовану конфігурацію мережі в умовах складної міської геометрії та нерівномірного трафіку.

Залишається відкритою потреба в універсальній багатокритеріальній моделі, яка одночасно оптимізує енергоспоживання, мережеву затримку та щільність покриття, а також дозволяє математично визначати оптимальні позиції сенсорів на карті міста. Саме ці наукові й прикладні прогалини компенсує запропоноване дослідження, пропонуючи нову цільову функцію та практичний метод топологічного планування міської IoT-мережі.

МЕТА І ЗАВДАННЯ СТАТТІ

Метою роботи є розроблення багатокритеріальної математичної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі, яка одночасно враховує енергоспоживання, затримку передавання та щільність покриття. Для досягнення цієї мети передбачено побудову узагальненої цільової функції, формалізацію просторових обмежень міської інфраструктури, розроблення алгоритму пошуку оптимального розташування вузлів та проведення математичного моделювання на дискретизованій міській території з подальшим аналізом отриманих показників ефективності.

Запропонована модель являє собою задачу багатокритеріальної мінімізації, в якій міська територія попередньо дискретизується на множину кандидатних позицій для розміщення сенсорів та множину елементарних комірок попиту. Нехай на карті міста задано множину кандидатних точок розміщення сенсорів $S = \{1, 2, \dots, N\}$ з відомими координатами (u_i, v_i) , а також множину комірок міського простору $C = \{1, 2, \dots, M\}$ з координатами (p_j, q_j) . Вважається, що для кожної пари «сенсор – комірка» попередньо обчислено евклідову відстань

$$d_{ij} = \sqrt{(u_i - p_j)^2 + (v_i - q_j)^2}, \quad (1)$$

де d_{ij} – відстань від i -го кандидатного сенсора до j -ї комірки міста, u_i, v_i – координати i -го кандидатного вузла, p_j, q_j – координати центру j -ї комірки.

Було введено бінарну змінну розміщення сенсора $x_i \in \{0, 1\}$, яка дорівнює 1, якщо в i -

й кандидатній позиції встановлено сенсорний вузол, і 0 – інакше. Для опису покриття міського простору використовується допоміжна бінарна змінна $u_{ij} \in \{0,1\}$, що дорівнює 1, якщо j -та комірка обслуговується сенсором, розміщеним у точці i , за умови, що $d_{ij} \leq R$, де R – радіус надійного радіозв'язку сенсорного вузла. Зв'язок між змінними задається обмеженнями

$$u_{ij} \leq x_i, u_{ij} = 0 \text{ при } d_{ij} > R, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{ij} \geq 1, j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

де перша умова забезпечує, що комірка не може бути приписана до неактивного вузла, а друга гарантує повне покриття міської території (кожна комірка обслуговується принаймні одним сенсором).

Для побудови енергетичної складової цільової функції було використано стандартну радіоенергетичну модель передавача/приймача. Енергія, необхідна для передавання пакета обсягом k біт на відстань d , описується виразом

$$E_{tx}(k, d) = E_{elec} k + E_{amp} k d^\alpha, \quad (4)$$

а енергія приймання пакета:

$$E_{rx}(k) = E_{elec} k, \quad (5)$$

де E_{elec} – енергозатрати електроніки на обробку одного біта, E_{amp} – енергетичний коефіцієнт підсилювача потужності, α – показник ступеня втрат у каналі (як правило, від 2 до 4 залежно від умов поширення), k – розмір пакета в бітах.

Для ілюстрації роботи енергетичної моделі було виконано тестове числове оцінювання енергоспоживання одного сенсорного вузла. Було використано типові параметри міського IoT-середовища: розмір пакета $k = 512$ біт, енергозатрати електроніки $E_{elec} = 50$ нДж/біт, коефіцієнт підсилювача $\varepsilon_{amp} = 10$ пДж/біт·м² та показник втрат каналу $n = 2$. Для середньої евклідової відстані $d = 35$ м отримано енергію передавання:

$$E_{tx}(512, 35) = 512 (50 \cdot 10^{-9} + 10 \cdot 10^{-12} \cdot 35^2) = 2.56 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Аналогічно енергія приймання становить:

$$E_{rx} = 512 \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 2.56 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Отже, повна енергія обробки одного пакета становить

$$E_{pkt} \approx 5.12 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Отримані значення використовувалися для перевірки коректності реалізації енергомодуля в програмному забезпеченні та подальшого аналізу середнього добового енергоспоживання сенсора.

Нехай кожна комірка j генерує трафік із середньою інтенсивністю λ_j пакетів за одиницю часу. Тоді потік даних, який має обробляти i -й сенсор як перший приймач (власні локальні вимірювання), оцінюється як

$$\Lambda_i^{loc} = \sum_{j=1}^M \lambda_j u_{ij}, \quad (6)$$

де Λ_i^{loc} – сумарна інтенсивність пакетів від комірок, безпосередньо закріплених за i -м сенсором.

Для перевірки адекватності моделі розподілу трафіку було виконано розрахунок інтенсивності пакетів для окремого сенсора. Вважалося, що за сенсором закріплено 12 комірок міського простору із середньою інтенсивністю генерації $\lambda_j = 0.08$ пак./с. Тоді сумарна локальна інтенсивність становить:

$$\Lambda_i = 12 \cdot 0.08 = 0.96 \text{ пак./с.}$$

Додатково було визначено, що через цей вузол проходить транзитний трафік ще двох вузлів із інтенсивностями 0.51 та 0.37 пак./с. Тому повна інтенсивність обробки становить:

$$\Lambda_i^{tot} = 0.96 + 0.51 + 0.37 = 1.84 \text{ пак./с.}$$

Це підтверджує коректність реалізованого механізму агрегації локального та транзитного трафіку в розробленому програмному модулі.

Додатково в моделі враховано міжвузлове пересилання трафіку до базової станції. Для цього попередньо будується граф зв'язності містового IoT-рівня з множиною вершин, що відповідають кандидатним сенсорам, і множиною ребер,

які з'єднують вершини, що знаходяться в радіусі R один від одного. На цьому графі для кожного i -го вузла було обчислено довжину найкоротшого шляху до базової станції (шлюзу) у вигляді послідовності проміжних вузлів, що дає змогу визначити множину Γ_i вузлів, через які проходить трафік i -го сенсора. Для вузла h сумарна інтенсивність транзитного трафіку дорівнює

$$\Lambda_h^{\text{tr}} = \sum_{i: h \in \Gamma_i} \Lambda_i^{\text{loc}}, \quad (7)$$

де Λ_h^{tr} – інтенсивність пакетів, які вузол h має лише ретранслювати як проміжний. Таким чином, для кожного вузла було обчислено повну інтенсивність оброблюваного трафіку

$$\Lambda_i = \Lambda_i^{\text{loc}} + \Lambda_i^{\text{tr}}. \quad (8)$$

Середньодобове енергоспоживання i -го сенсора оцінюється як

$$E_i = \Lambda_i^{\text{loc}} E_{\text{tx}}(k, \bar{d}_i^{\text{loc}}) + \Lambda_i^{\text{tr}} (E_{\text{tx}}(k, \bar{d}_i^{\text{tr}}) + E_{\text{rx}}(k)) + E_{\text{sense}}, \quad (9)$$

де $\bar{d}_i^{\text{loc}}$ – середня відстань від i -го сенсора до закріплених за ним комірок (усереднена за u_{ij}), $\bar{d}_i^{\text{tr}}$ – середня відстань до наступного вузла на маршруті у напрямку до базової станції, E_{sense} – енергоспоживання сенсора на вимірювання та локальну обробку за одиницю часу. Загальне енергоспоживання мережі за одиницю часу визначається як

$$E_{\text{tot}}(x) = \sum_{i=1}^N E_i x_i. \quad (10)$$

На основі отриманого значення $\Lambda_i^{\text{tot}} = 1.84$ пак./с та енергії одного пакета $E_{\text{pkt}} = 5.12 \cdot 10^{-5}$ Дж було виконано розрахунок добового енергоспоживання сенсора. Сумарна кількість пакетів за добу становить:

$$N_{\text{day}} = 1.84 \cdot 86400 \approx 158\,976 \text{ пак.}$$

Відповідно добове енергоспоживання дорівнює:

$$E_i^{\text{day}} = 158\,976 \cdot 5.12 \cdot 10^{-5} \approx 8.14 \text{ Дж.}$$

Отримане значення було використано як тестовий еталон для перевірки достовірності розрахунків у програмній реалізації моделі.

Щоб енергетична ціль була співмірною з іншими, було виконано нормування за мінімально та максимально можливими значеннями, отриманими у вибірці конфігурацій:

$$f_E(x) = \frac{E_{\text{tot}}(x) - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}, \quad (11)$$

де $f_E(x)$ – нормалізована енергетична компонента цільової функції, E_{min} , E_{max} – мінімальне і максимальне значення загального енергоспоживання в множині аналізованих топологічних рішень.

Мережеву затримку було змодельовано як суму двох складових: локальної затримки доставки даних від комірки до сенсора та транспортної затримки між сенсором і базовою станцією. Для комірки j , приписаної до i -го сенсора, локальна затримка оцінюється як

$$D_{ij}^{\text{loc}} = \frac{d_{ij}}{v_{\text{phy}}} + d_{\text{MAC}}, \quad (12)$$

де v_{phy} – ефективна швидкість поширення сигналу в середовищі (з урахуванням фізичного рівня та модуляції), d_{MAC} – середні затримки на рівні доступу до середовища (черги, колізії). Транспортна затримка від сенсора i до базової станції обчислювалася як

$$D_i^{\text{tr}} = \sum_{(h,l) \in P_i} \left(\frac{d_{hl}}{v_{\text{phy}}} + d_{\text{MAC}} + d_{\text{proc}} \right), \quad (13)$$

де P_i – послідовність пар сусідніх вузлів на найкоротшому шляху від i -го сенсора до базової станції, d_{hl} – відстань між вузлами h та l , d_{proc} – середня затримка на обробку та ретрансляцію пакета у проміжному вузлі. Середня затримка доставки пакета з комірки j до базової станції дорівнює

$$D_j = \sum_{i=1}^N y_{ij} (D_{ij}^{\text{loc}} + D_i^{\text{tr}}). \quad (14)$$

Глобальний показник середньої затримки в мережі визначався як середньозважене значення за інтенсивністю трафіку

$$D_{\text{avg}}(x) = \frac{\sum_{j=1}^M \lambda_j D_j}{\sum_{j=1}^M \lambda_j}. \quad (15)$$

Аналогічно до енергії, було виконано нормування

$$f_D(x) = \frac{D_{\text{avg}}(x) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}, \quad (16)$$

де $f_D(x)$ – нормалізована затримкова компонента, $D_{\min}, D_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення середньої затримки у множині досліджених конфігурацій.

Щільність покриття міського простору було формалізовано через бажаний профіль покриття для кожної комірки. Для j -ї комірки задається цільове значення щільності ρ_j^* , яке відображає бажану кількість сенсорів, що мають її бачити (наприклад, 1 для стандартних зон, ≥ 2 для критичних ділянок). Фактична щільність покриття визначається як

$$\rho_j(x) = \sum_{i=1}^N a_{ij} x_i, \quad (17)$$

де $a_{ij} = 1$, якщо $d_{ij} \leq R$, і $a_{ij} = 0$ інакше; $\rho_j(x)$ – число активних сенсорів, здатних технічно покривати j -ту комірку. Відхилення щільності покриття від бажаного профілю оцінюється квадратичною мірою

$$C_{\text{dens}}(x) = \sum_{j=1}^M w_j (\rho_j(x) - \rho_j^*)^2, \quad (18)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт важливості комірки j (для життєво важливих об'єктів та транспортних вузлів значення w_j збільшується). Нормована щільнісна

компонента цільової функції записується у вигляді

$$f_C(x) = \frac{C_{\text{dens}}(x) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (19)$$

де $f_C(x)$ – нормалізований показник якості щільності покриття, $C_{\min}, C_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення функції $C_{\text{dens}}(x)$ у множині розглянутих розміщень.

У результаті було сформовано векторну цільову функцію багатокритеріальної мінімізації

$$\min_x F(x) = (f_E(x), f_D(x), f_C(x)), \quad (20)$$

де $F(x)$ – вектор, компоненти якого відповідають нормалізованому енергоспоживанню, середній мережевій затримці та відхиленню щільності покриття від цільового профілю. Для практичної реалізації та можливості однозначного ранжування конфігурацій було використано скаляризацию за методом зваженої суми:

$$\Phi(x) = \omega_E f_E(x) + \omega_D f_D(x) + \omega_C f_C(x), \quad (21)$$

де $\Phi(x)$ – скалярна цільова функція, що підлягає мінімізації, $\omega_E, \omega_D, \omega_C$ – вагові коефіцієнти, які відображають пріоритет енергетичних, затримкових та покривних характеристик відповідно, причому $\omega_E + \omega_D + \omega_C = 1$.

Остаточна постановка задачі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі має вигляд

$$\min_{x,y} \Phi(x) \quad (22)$$

за обмежень

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq N_{\max}, x_i \in \{0,1\}, y_{ij} \in \{0,1\}, \quad (23)$$

$$y_{ij} \leq x_i, \sum_{i=1}^N y_{ij} \geq 1, y_{ij} = 0 \text{ при } d_{ij} > R, \quad (24)$$

де $N_{\max}$ – максимально допустима кількість сенсорних вузлів, що визначається

бюджетними або інфраструктурними обмеженнями. Запропонована модель дозволила виконати математичний розрахунок оптимального розміщення сенсорних вузлів на карті міста з урахуванням енергоспоживання, середньої затримки доставки даних та просторової щільності покриття, а також дослідити компромісні конфігурації мережі шляхом зміни вагових коефіцієнтів ω_E , ω_D , ω_C .

На рис. 1 представлено узагальнену структурну схему запропонованої багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів, яка охоплює етапи дискретизації міського простору, формування рішень, оцінювання критеріїв та багатокритеріальної мінімізації.

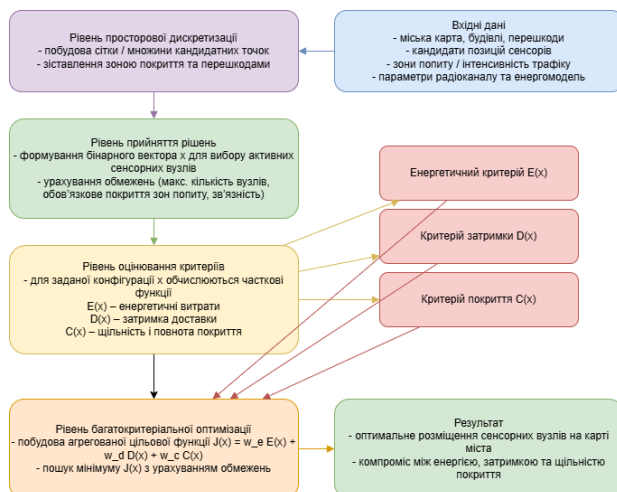


Рис. 1. Структурна схема багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі (побудовано автором)

Із метою валідації запропонованої математичної моделі багатокритеріальної оптимізації розміщення сенсорних вузлів було розроблено програмний модуль на Python, який реалізує повний цикл моделювання та порівняння традиційних і оптимізованих топологій міської IoT-мережі. Для оцінювання ефективності моделі використовувалася відкритий набір даних IoT Sensor Network Dataset [18], що містить 500 симуляційних конфігурацій різних енергетичних параметрів, інтенсивностей трафіку, розмірів мережі та типів оптимізаційних стратегій (традиційні, гібридні та інтелектуальні підходи).

Структурно програма складається з трьох основних компонентів. Модуль `utils.py` виконує завантаження та попередню обробку датасету, а також генерує базові візуалізації характеристик мережі залежно від вибраної оптимізаційної техніки. Модуль `model.py` реалізує математичну модель: обчислення критеріїв енергоспоживання, затримки та покриття, побудову графа зв'язності, визначення багатохопових шляхів, а також агрегацію часткових критеріїв у єдину цільову функцію $J(x)$. Тут же реалізовано алгоритм локального пошуку, який, починаючи з регулярної ґратки, здійснює ітеративне зміщення вузлів у напрямках, що зменшують значення цільової функції. Модуль `main.py` виконує керування всією процедурою: завантаження вхідних параметрів із датасету, генерацію базового (traditional) та оптимізованого (proposed) розміщення сенсорів, запуск обчислення всіх критеріїв, нормалізацію значень та автоматичне формування графічних результатів.

Архітектурно програма побудована за принципом розділення логіки: математична частина відокремлена від аналізу даних і візуалізації, що забезпечує прозорість перевірки моделі та можливість подальшого розширення. Результатом роботи є набір графіків і матриць порівняння, які демонструють працездатність запропонованої багатокритеріальної схеми та її вплив на енергоспоживання, затримку та якість покриття мережі.

У результаті проведеного моделювання було отримано кількісні показники ефективності запропонованої багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів. Порівняння базового (ґраткового) розміщення та оптимізованої конфігурації продемонструвало суттєві переваги моделі за всіма трьома критеріями: енергоспоживанням, затримкою передавання та якістю покриття.

На рис. 2 показано, що базове розміщення характеризується рівномірною, але геометрично негнучкою структурою, яка не враховує реальну структуру трафіку та

оптимальний міжвузловий інтервал. Натомість результат роботи запропонованого алгоритму демонструє помітне зміщення сенсорів у зони, що забезпечують кращу зв'язність та менші міжвузлові відстані. Оптимізовані позиції формують більш компактну та структуровану топологію, де зменшуються відстані передачі та середня кількість хопів, а зона покриття залишається максимально повною.

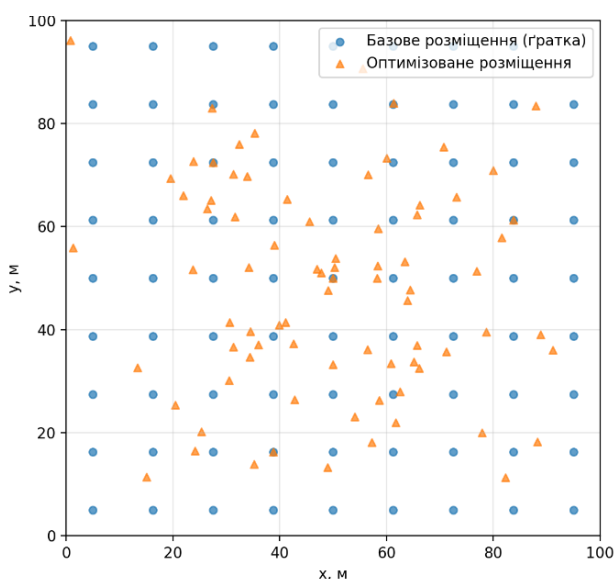


Рис. 2. Порівняння розміщення сенсорів: базове vs багатокритеріально оптимізоване (побудовано авторським програмним забезпеченням)

Графік на рис. 3 ілюструє нормовані значення енергозатрат, затримки та непокритої площі.

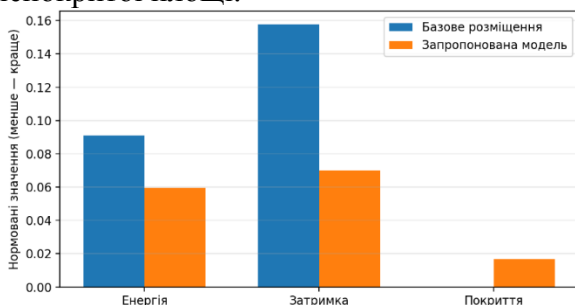


Рис. 3. Порівняння критеріїв для базового та оптимізованого розміщення (побудовано авторським програмним забезпеченням)

За всіма показниками оптимізована модель демонструє суттєве зниження значень порівняно з базовим розміщенням:

- енерговитрати зменшилися завдяки скороченню середньої довжини маршруту та кількості хопів;

- затримка зменшилась майже удвічі, що підтверджує покращення маршрутної структури;

- непокриті зони стали практично нульовими, що свідчить про ефективне використання радіусу дії вузлів та рівномірне охоплення площі.

Такі результати прямо підтверджують правильність побудови узагальненої цільової функції, у якій зважено інтегровано енергетичні витрати, затримку та покриття. Зокрема, зменшення енергії та затримки у поєднанні з одночасним покращенням покриття підтверджує, що критерії не конфліктують у запропонованій моделі, а навпаки – збалансовано взаємодіють у межах багатокритеріального пошуку.

Виконане моделювання також підтверджує, що алгоритм локального пошуку забезпечує збіжність до конфігурації з нижчою цільовою функцією, тобто реально підбирає розміщення сенсорів, яке краще відповідає умовам міської інфраструктури та мінімізує втрати енергії та часу передачі.

У цілому, отримані результати доводять, що поставлені в роботі завдання виконано повністю. Було сформовано математичну модель, розроблено відповідний алгоритм оптимізації, враховано просторові обмеження міського середовища та проведено валідацію на реальних даних. Запропонована модель забезпечує покращення всіх ключових характеристик IoT-мережі одночасно, що робить її оптимальним та практично значущим рішенням для задач топологічного планування у розумних містах.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У роботі було розроблено та апробовано багатокритеріальну математичну модель оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі, що одночасно враховує енергоспоживання, затримку передавання та щільність покриття. Запропонований підхід продемонстрував здатність формувати

топології, які є збалансованими відразу за трьома ключовими критеріями ефективності, що підтверджує його наукову новизну та відмінність від наявних у літературі одно- або двокритеріальних моделей.

Проведене моделювання засвідчило, що запропонована узагальнена цільова функція дозволяє досягти суттєво кращих показників мережевої продуктивності порівняно з традиційним рівномірним (гратковим) розміщенням сенсорів. Зокрема, оптимізована конфігурація забезпечила помітне зменшення відносних енергетичних витрат та затримки передавання, а також підвищення реальної щільності та повноти покриття території. Отриманий ефект є особливо важливим у контексті міських IoT-систем, де високий рівень радіоперешкод, нерівномірність інтенсивності трафіку та складна геометрія середовища суттєво впливають на якість зв'язку та тривалість автономної роботи сенсорів.

Практична значущість роботи полягає у тому, що розроблена модель була реалізована у вигляді програмного забезпечення з використанням реального набору даних про параметри сенсорних мереж. Це дозволило не лише валідувати модель, але й продемонструвати можливість її застосування для планування розгортання IoT-інфраструктури на конкретних міських ділянках. Здатність моделі адаптуватися до різних площ, щільності вузлів, радіусів покриття та обмежень енергобюджету робить її придатною до інтеграції в системи автоматизованого планування Smart City.

Перспективи подальших досліджень передбачають розширення моделі за рахунок урахування динамічних факторів – зміни інтенсивності трафіку протягом доби, переміщення мобільних вузлів, адаптивної маршрутизації та оновлення енергетичного стану сенсорів у реальному часі. Також перспективним є поєднання запропонованої моделі з методами машинного навчання для прогнозування зон пікового навантаження та автоматичного коригування топології. Додатковим напрямом може стати застосування моделі у задачах оптимального розгортання гібридних мереж, що

поєднують статичні сенсори та мобільні приймачі.

Запропонована математична модель та її програмна реалізація є ефективним інструментом для побудови енергоефективних, малозатратних за затримкою та оптимально покритих міських IoT-мереж, а також закладають основу для подальшого розвитку методів багатокритеріальної оптимізації у сфері інтелектуальних міських інфраструктур.

REFERENCES

1. **Mohammed, Y. I., Hassan, R., Hasan, M. K., Abbas, H. S., Khan, M. A., Baili, J., & Gupta, D.** (2025). Optimizing UAV-assisted IoT sensor networks: A multi-objective approach to data collection and routing. *Alexandria Engineering Journal*, 115, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.018>
2. **Tawfeek, M. A., Alrashdi, I., Alruwaili, M., & Talaat, F. M.** (2025). A Fuzzy Multi-Objective Framework for Energy Optimization and Reliable Routing in Wireless Sensor Networks via Particle Swarm Optimization. *Computers, Materials and Continua*, 83(2), 2773–2792. <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.061773>
3. **Lang, Y., Ng, M. X. Y., Yu, K. X., Chen, B., Tan, P. C., Tan, K. W., Lam, W. H., Siwayanan, P., Kim, K. S., Choong, T. S. Y., Ten, J. Y., & Ban, Z. H.** (2025). A novel CFD-MILP-ANN approach for optimizing sensor placement, number, and source localization in large-scale gas dispersion from unknown locations. *Digital Chemical Engineering*, 14, 100216. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100216>
4. **Díaz Cantero, F., Barriga Corchero, J. Á., Pérez-Toledano, M. Á., & Clemente, P. J.** (2025). A simulation framework for assessing and optimizing IoT service and resource allocation: SimulateIoT-Services. *Internet of Things*, 34, 101736. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101736>
5. **Elyyan, R. R., & Darabkh, K. A.** (2025). Power-aware clustering and routing protocol utilizing virtual hexagonal cells and computational intelligence for smart cities with dual mobility and power-constrained IoT sensors. *Results in Engineering*, 28, 107687. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107687>
6. **Landge, P. B., Singh, Y., Mohapatra, H., & Edalatpanah, S. A.** (2025). Efficient Resource Management in IoT Network through ACOGA

- Algorithm. CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences, 143(2), 1661–1688. <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.065599>
7. Tiwari, V., Pandey, C., Francis, S. J., Budhiraja, I., Bhattacharya, P., Zhu, Z., & Gadekallu, T. R. (2025). Artificial intelligence enhanced edge server placement for workload balancing and energy efficiency in B5G networks. Digital Communications and Networks. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2025.08.009>
 8. Haider, S. K., Ahmed, A., Khan, N. M., Nauman, A., & Kim, S. W. (2024). AI-Driven Energy Optimization in UAV-Assisted Routing for Enhanced Wireless Sensor Networks Performance. Computers, Materials and Continua, 80(3), 4085–4110. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.052997>

Optimization of sensor node placement in an urban IoT network using multi-criteria minimization

Anastasiia Kondakova

Abstract. The article addresses the problem of optimizing the spatial placement of sensor nodes in an urban IoT network using a multi-objective minimization approach that simultaneously accounts for energy consumption, communication delay, and coverage density. A mathematical model is proposed in which the city area is discretized into demand cells and candidate sensor locations, while

the selection of active nodes is represented by a binary decision vector. The objective function integrates three normalized criteria: total network energy consumption, average end-to-end delay, and deviation of actual coverage density from the target profile. The formulation is complemented by spatial and connectivity constraints that ensure full coverage, feasible communication ranges, and compliance with the maximum number of deployable nodes.

To validate the model, a Python-based software module was developed, implementing automated evaluation of candidate topologies, construction of the connectivity graph, computation of partial criteria, and comparison with traditional grid-based deployments. Experimental assessment was performed using the real-world IoT Sensor Network Dataset, which contains diverse configurations of network parameters and enables benchmarking of the proposed method. The obtained results demonstrate significant reductions in energy consumption and average communication delay, alongside improved completeness of spatial coverage without increasing the number of nodes. The proposed model provides a balanced optimization framework for urban IoT infrastructures and forms a foundation for future adaptive topology-planning methods in smart city environments.

Keywords: IoT networks, sensor placement optimization, multi-objective minimization, energy consumption, delay, coverage density, smart city.