

АНОТАЦІЯ

Гаврилюк Є. А. Моделі, методи та інформаційна технологія гібридної еволюційно-ройової оптимізації в задачах покриття у територіально-розподілених системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки (Галузь знань 12 – Інформаційні технології). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці моделей, методів та інформаційної технології гібридної еволюційно-ройової оптимізації для розв'язання задач неперервного максимального геометричного покриття у територіально-розподілених системах. Задача полягає в оптимальному розміщенні скінченної сукупності геометричних об'єктів довільної форми з метою максимізації площі покриття заданої області на евклідовій площині за наявності геометричних обмежень та заборонених зон. Ця задача є NP-важкою, характеризується мультиекстремальним ландшафтом цільової функції та високою обчислювальною вартістю оцінки площі покриття, що обумовлює необхідність розробки спеціалізованих гібридних методів оптимізації. Запропонований підхід базується на поєднанні глобального стохастичного пошуку ройових метаевристик із детермінованою локальною оптимізацією на основі квазіньютонівських методів та нейромережевих механізмів керування оптимізаційним процесом. Результати дисертації мають як наукову новизну, так і практичне значення для побудови ефективних систем просторового планування та оптимізації сервісного покриття.

Перший розділ присвячений комплексному аналізу наукових джерел з питань математичного моделювання задач максимального покриття та методів

їх розв'язання. Систематичний огляд літератури виконано за трьома напрямками: математичне моделювання задач покриття – від класичних дискретних цілочисельних постановок до неперервних узагальнень з об'єктами довільної форми; методи еволюційно-ройової та гібридної оптимізації, включаючи ройові метаевристики та меметичні алгоритми; а також прикладні аспекти задач покриття у територіально-розподілених системах, що охоплюють задачі аварійного реагування, розгортання сенсорних мереж, комерційного розміщення об'єктів обслуговування та задачі в геоінформаційних системах. Розглянуто математичний апарат, що забезпечує формалізацію умов неперетину, належності та покриття для об'єктів складної форми. Показано, що сучасні бібліотеки обчислювальної геометрії створюють практичну основу для точного обчислення площі перетину геометричних фігур довільної конфігурації.

На основі проведеного аналізу виявлено ключові прогалини, що визначають напрям дисертаційного дослідження: переважна більшість існуючих методів зорієнтована на об'єкти простої форми та не забезпечує комплексного розв'язання задачі неперервного максимального покриття із зонами обслуговування довільної форми та заборонними зонами; у літературі відсутнє систематичне порівняння ройових метаевристик у поєднанні з методами локальної оптимізації для задач покриття; питання архітектурної формалізації відповідної інформаційної технології залишається нерозглянутим. Згідно з виявленими прогалинами сформульовано мету дослідження, а також математичну модель задачі нелінійного програмування у просторі неперервних параметрів розміщення з переходом до безумовної оптимізації через механізм зовнішньої штрафної функції.

У другому розділі детально розглянуто та описано методичний апарат для розв'язання задачі максимального покриття. Для обчислення цільової

функції проаналізовано та систематизовано п'ять методів оцінки площі конфігурації покриття, що утворюють спектр від найшвидших із низькою точністю, таких як метод мінімальних описаних прямокутників, до найточніших із високою обчислювальною вартістю – точні булеві операції засобами бібліотеки обчислювальної геометрії. Стохастичний метод Монте-Карло з просторовою індексацією R-Tree визначено як основний метод обчислення цільової функції для багаторазового виклику в циклі оптимізації завдяки оптимальному компромісу між точністю та обчислювальною вартістю. Сформульовано рекомендації щодо вибору методу залежно від етапу оптимізації та кількості покриваючих об'єктів. Проведено обчислювальні експерименти, що підтвердили теоретичні оцінки точності та складності кожного методу.

Для оптимізаційної компоненти чотири ройові метаевристики обчислювального інтелекту (оптимізацію роєм частинок, пошук риб'ячої зграї, алгоритм світлячків та алгоритм штучної бджолоїної колонії) адаптовано до задачі максимального покриття, де кожен агент рою кодує повну конфігурацію розміщення покриваючих об'єктів у високорозмірному просторі параметрів. Для кожного алгоритму обґрунтовано вибір метапараметрів та визначено рекомендовані діапазони їх значень. Порівняльний аналіз алгоритмів на серіях задач зростаючої складності дозволив визначити характерні переваги та обмеження кожного методу. Водночас встановлено, що спільним обмеженням усіх розглянутих ройових алгоритмів є недостатня здатність до точного локального уточнення розв'язків поблизу знайденого оптимуму, що обумовлює необхідність розробки гібридних алгоритмів, які поєднують глобальний ройовий пошук з локальною оптимізацією на основі градієнтних методів.

У третьому розділі досліджено гібридні методи розв'язання задачі неперервного максимального покриття, що поєднують глобальний стохастичний пошук ройових метаевристик із детермінованою локальною оптимізацією та нейромережевим керуванням. Обґрунтовано застосування квазіньютонівського методу BFGS як локальної компоненти гібридних алгоритмів. Розглянуто підхід до чисельного оцінювання градієнта цільової функції на основі матриці площ попарних перетинів покриваючих об'єктів, що забезпечує суттєве прискорення обчислень порівняно з прямим перерахунком площі складного об'єкта. Квазіньютонівський метод із скінченно-різницевою апроксимацією градієнта продемонстрував суперлінійну збіжність та здатність знаходити високоякісні локальні оптимуми.

Розроблено узагальнену меметичну методологію для задач максимального геометричного покриття, яка поєднує чотири ройові метаевристики з локальною оптимізацією BFGS. Для кожної з чотирьох гібридних комбінацій визначено оптимальну частоту виклику локального пошуку, рекомендовані параметри та критерії зупинки. Показано, що гібридна схема є універсальною і може бути застосована до будь-якого з розглянутих ройових алгоритмів без зміни їхньої базової структури. Встановлено, що меметичний підхід стабільно підвищує площу покриття порівняно з чистими ройовими методами при помірному збільшенні обчислювальних витрат. Проведений порівняльний аналіз підтвердив, що гібридний метод стабільно перевершує як чистий ройовий пошук, так і мультістартову локальну оптимізацію при однаковому обчислювальному бюджеті, причому перевага зростає зі збільшенням кількості покриваючих об'єктів.

Також запропоновано нейронно-керовані гібридні методи максимізації покриття, що інтегрують нейронні мережі у оптимізаційний процес за двома напрямками: адаптивне керування штрафним коефіцієнтом та динамічне

налаштування гіперпараметрів ройових алгоритмів. Для кожного напрямку визначено архітектуру нейронної мережі, вхідні ознаки та функцію втрат. На основі порівняльного аналізу трьох парадигм навчання обґрунтовано вибір навчання з підкріпленням як найбільш перспективного підходу, що забезпечує автоматичне формування стратегії керування без потреби у попередньому зборі еталонних даних.

В четвертому розділі представлено цілісну UML-орієнтовану інформаційну технологію розв'язання неперервних задач максимального покриття з об'єктами довільної форми. Технологія формалізує архітектуру, структури даних, інформаційні потоки та алгоритмічні компоненти системи, забезпечуючи відтворюваність, масштабованість і прозорість процесу проєктування програмних рішень для задач покриття. Сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги до системи, визначено атрибути якості. Для обґрунтування вибору архітектурної моделі застосовано метод багатокритеріального прийняття рішень TOPSIS з експертними оцінками альтернатив, на основі якого обрано трирівневу архітектуру.

На основі обраної архітектури побудовано комплекс UML-діаграм, що формалізують структурні, поведінкові та інтеграційні аспекти системи та формують стандартизований архітектурний каркас. Введено універсальний метамодуль оцінювання площі покриття, що об'єднує п'ять незалежних стратегій обчислення та підтримує їх адаптивне перемикання. Розроблено оригінальну модель життєвого циклу конфігурації у вигляді діаграми станів, яка формалізує переходи між станами оцінювання, покращення та архівації кандидатних рішень. Сформовано композитну структуру оптимізаційного ядра, що визначає внутрішню організацію глобального пошуку, локального покращення, моніторингу та стратегічного керування. На відміну від існуючих

досліджень, що концентруються лише на алгоритмах, запропонована технологія враховує повний життєвий цикл програмної системи.

Сукупність отриманих у дисертації наукових результатів, підтвердження факту їх достовірності, наукової та практичної значущості дають змогу вважати, що сформульована наукова задача розробки моделей, методів та інформаційної технології гібридної еволюційно-ройової оптимізації для підвищення ефективності розв'язання задач максимального геометричного покриття у територіально-розподілених системах, є розв'язаною, а поставлена мета – досягнута.

Запропонований підхід реалізовано як розподілена комп'ютерна система зі спеціалізованим обчислювальним ядром, інтегрованим з підсистемами зберігання просторових даних та візуалізації.

Ключові слова: задача максимального покриття, оптимізація, математичне моделювання, розміщення, еволюційно-ройові алгоритми, метод BFGS, гібридна система, безпілотні літальні апарати, інформаційна технологія, нейронні мережі, машинне навчання, глибоке навчання, прийняття рішень, комп'ютерна система, агентний підхід.