

The proposed method offers significant advantages over classical approaches, such as DHCP Snooping, which require manual configuration and are ineffective against attacks involving MAC spoofing. The developed model and methodology demonstrate exceptional reliability, achieving 100% detection accuracy for DHCP spoofing attacks, which is critical for maintaining real-time network responsiveness. The results confirm the effectiveness of behavioral analysis of DHCP sessions combined with machine learning techniques for anomaly detection, opening up new possibilities for integration into practical traffic monitoring and network security systems.

Key words: cyber threats, infrastructure attacks, artificial intelligence, network security, DHCP spoofing, IDS, machine learning.

Отримано: 14.06.2025

УДК 004.421.2

DOI: 10.32626/2308-5916.2025-27.121-127

Т. М. Пилипюк, канд. фіз.-мат. наук,

В. С. Щирба, канд. фіз.-мат. наук

Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський

СПЕЦИФІКА БАГАТОПОТОКОВОГО МЕТОДУ РЕАЛІЗАЦІЇ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

Дана робота присвячена дослідженню специфіки та перспектив використання принципів розгалужених систем та паралельного програмування при обробці мережевих графових моделей. Предметом експериментального вивчення характеристик особливостей слугує поліноміальний біоінспірований мурашиний алгоритм, що базується на метаевристичному підході моделювання поведінки мурах. Метою дослідження є одержання адекватних результатів побудови прогнозованих траєкторій руху, що задовольняють умовам оптимізації.

Мотивацією розгляду поставленої задачі та досягнення мети роботи послужило широке коло прикладних задач, що виникають як на регіональному рівні в рамках програми економічного та соціального розвитку міської громади, так і перспективних напрямків наукового дослідження від планування робіт економічного та соціального розвитку, оптимізації транспортних перевезень до дослідження телекомунікаційних мереж та систем штучного інтелекту. Результати дослідження можуть використовуватися для планування військових операцій при груповому застосуванні різного роду підрозділів збройних сил, особливо, коли передбачається ураження групових цілей.

Використання евристичного мурашиного алгоритму для дослідження задач, що подаються у вигляді графових моделей

і легко піддаються реструктуризації методами та засобами багатопотокових технологій обробки великих даних, надає можливості для ефективного підвищення швидкодії обчислень засобами високопродуктивних обчислювальних підходів, особливо у тих випадках, коли необхідно одночасно проаналізувати велику кількість допустимих маршрутів. Таке органічне поєднання двох технологій дозволяє не лише прискорити обчислювальний процес пошуку оптимального маршруту, але й забезпечити кращу масштабованість досліджуваної системи.

У межах дослідження головний акцент зроблено на використання багатопотокових розрахунків, що дозволяє реалізувати масштабовану архітектуру, здатну до паралельної обробки великої кількості агентів у реальному часі.

Ключові слова: *графові моделі, мурашиний алгоритм, розподілені системи та паралельне програмування.*

Вступ. У сучасному світі питання продуманого ефективного формування маршрутів є надзвичайно актуальним у багатьох сферах – від планування робіт в економіці та логістики в транспорті до дослідження телекомунікаційних мереж та систем штучного інтелекту і навіть соціальних процесів.

Одним із перспективних та мало досліджених напрямів, пов'язаних з формуванням маршрутів, є задачі підвищення ефективної реалізації поставлених завдань групою виконавців. Сюди можна віднести планування бойових дій та вдосконалення методики застосування в сучасних умовах групи пілотованої авіації чи масованої атаки безпілотних літальних апаратів, удосконалення перерозподілу їх по задачах (вибраних цілях) при спільній реалізації бойового завдання [4]. В повідомленнях із зони бойових дій все частіше відзначають, що застосування групової авіації дає більш значущі результати ніж розріджені польоти. Тому постійно зростає актуальність задачі оптимізації перерозподілу сил як пілотованої, так і безпілотної авіації при вирішенні поставлених задач (на ліквідацію ворожих сил, розвідувальних чи спеціальних).

Усі зазначені прикладні задачі з формування маршрутів мають спільну особливість – для них досить просто і ефективно можна побудувати математичну модель, використовуючи теорію графів. Для графових моделей розроблено чимало математичних методів та алгоритмів, які дозволяють проводити оперативний аналіз, прогнозування всеможливих ситуацій та вибір оптимального рішення при плануванні роботи з врахуванням специфіки роботи організації, підприємства, фірми чи компанії.

При дослідженні графових моделей дослідниками особлива увага надається біоінспірованим алгоритмам, тобто алгоритмам, що натхненні природними процесами, серед яких вагоме місце належить мурашиному алгоритму – метаевристичному підході, що базується на моделюванні

поведінки мурахи або колонії мурах в природньому середовищі [2-5]. Мурашиний алгоритм показує високі результати при розв'язанні цілого ряду прикладних задач: задачі комівояжера в різних модифікаціях, пошуку оптимальних мережеских маршрутів, плануванні виробничих процесів та інших прикладних комбінаторних графових задач.

Мурашиний алгоритм давно використовується в різних сферах науки та техніки. Ця еволюційна поведінка дозволяє алгоритму ефективно знаходити рішення задач комівояжера, маршрутизації транспорту, розподілу ресурсів, кластеризації та навіть у медицині, наприклад, для аналізу зображень або діагностичних завдань.

При моделюванні складних систем стрімко зростає обсяг даних, логічна складність маршрутних структур, але разом з тим актуальною залишається вимога щодо оперативної обробки властивостей моделі. Тому виникає необхідність у застосуванні високопродуктивних обчислювальних методів та підходів. Не можна не погодитися, що застосування багатопотокових (паралельних) методів та розгалужених структур є одним із перспективних варіантів досягнення мети в цій галузі. Такі методи забезпечують значне скорочення часу на обчислення шляхом перерозподілу навантаження між декількома паралельними потоками.

Використання мурашиного алгоритму для дослідження графових моделей у поєднанні з багатопотоковими технологіями обробки даних відкриває хороші можливості для підвищення швидкодії обчислень, особливо у тих випадках, коли необхідно одночасно проаналізувати велику кількість допустимих маршрутів. Таке поєднання дозволяє не тільки прискорити обчислювальний процес пошуку оптимального маршруту, але й забезпечити кращу масштабованість досліджуваної системи.

Мета роботи – дослідження специфіки та ефективності багатопотокового методу реалізації мурашиного алгоритму при оптимізації маршрутів у складних графових структурах, здійснення аналізу впливу принципів паралельного програмування на швидкодію пошуку оптимальних рішень.

Основна частина. Ключова ідея мурашиного алгоритму ґрунтується на імітації поведінки реальних мурах (групи чи поодиноких в залежності від прикладної задачі), які шукають найкоротші маршрути між мурашником і джерелом їжі. Важливим моментом є те, що, пересуваючись, мурахи залишають, так званий, феромонний слід, який потім використовується для вибору оптимального маршруту. Важливо також, що з плином часу насиченість феромону зменшується, що дозволяє адаптуватися до зміни ситуації та відкидати безперспективні маршрути.

Можна виділити чотири етапи виконання мурашиного алгоритму:

1. Ініціалізація алгоритму – задаються вхідні дані алгоритму. Оскільки в задачі комівояжера граф повний, то зручніше використати

вагову матрицю, а при пошуку оптимальних ланцюгів матриця суміжності може виявитися досить розрідженою. Тоді доцільно користуватися методами обробки розріджених даних.

2. Розміщення мурах – на початку ітерацій в задачі комівояжера у кожну вершину потрібно розмістити по одній мураші або групі мурах однакової кількості. При відшукуванні оптимальних ланцюгів мурахи обирають початкову позицію в стартовій вершині (мурашнику).
3. Побудова ітераційного рішення – кожна мураха або певна група мурах (в залежності від постановки прикладної задачі) обирає наступну вершину враховуючи довжину допустимого шляху та рівень феромону на ньому. В літературних джерелах вказуються одні й ті ж математичні розрахунки, наприклад, у [2]: «Мураха рухатиметься від вузла i до вузла j з ймовірністю

$$p_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}{\sum (\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)},$$

де $\tau_{i,j}$ – кількість феромонів на ребрі i, j ; α – параметр, що контролює вплив $\tau_{i,j}$; $\eta_{i,j}$ – привабливість ребра i, j (початкове значення, як правило, $1/d_{i,j}$, де d – відстань); β – параметр, що контролює вплив $\eta_{i,j}$.

Варто зауважити, що тут не враховується випадок, коли наявні допустимі ребра мають однакову вагу. За аналогією дій штурмових груп загін виконавців при невизначеності пріоритетного маршруту розбивається на окремі групи, які рухаються по рівнозначних маршрутах. Отже, тоді потрібно посилати не окрему мурашу, а групу мурах. Такий підхід не є раціональним, адже значно ускладнює структуру програмного продукту. Доцільно випадковим методом обрати один із маршрутів та провести серію обчислювальних експериментів. Уже при 30 спробах математичне сподівання при двох альтернативних маршрутах буде близьким до $1/2$, що узгоджується з випадком поділу штурмової групи на два загони.

4. Оновлення феромону – після завершення проходу на кожній ітерації рівень феромону на пройдених маршрутах зменшується з деякою швидкістю, що дозволяє підсилювати хороші маршрути та послаблювати гірші рішення. Оскільки маршрути, що ведуть до кращих рішень, отримують більше феромону, то вони мають вищий шанс бути обраними в майбутніх ітераціях. Такий підхід забезпечує логічний процес вибору кращих рішень, адже після кожного нового циклу мурашиний алгоритм стає все більш точним і поступово наближається до оптимального результату.
5. Перевірка критерію завершення роботи алгоритму – алгоритм циклічно повторюється до досягнення певної запропонованої кількості ітерацій або при одержанні стабільного рішення.

Було б не справедливо не відмітити і недоліки мурашиного алгоритму, серед яких, зокрема, є: складність обґрунтування висновків, оскільки остаточний розв'язок приймається на основі побудови послідовності випадкових рішень; невизначеність часу збіжності; складність побудови ітерацій; можливість втратити оптимальний розв'язок через ймовірнісний підхід вибору шляху.

Характерною особливістю мурашиного алгоритму є майже повна незалежність агентів при прийнятті управлінських рішень. Цей факт дозволяє легко реалізовувати декомпозицію задачі і реалізувати алгоритм у розподілених системах, де локальні підзадачі можуть виконуватись паралельно. При цьому отримуємо можливість скористатися перевагами паралельного програмування, що дозволяє алгоритму працювати швидше та ефективніше, особливо при розв'язанні складних задач, які потребують значних обчислювальних ресурсів [1].

Використання багатопотокової обробки в мурашиному алгоритмі реалізується різними методами, залежно від особливостей платформи та специфіки поставленої задачі. Очевидним і найпоширенішим варіантом є розподіл мурах між окремими потоками, де кожен потік займається побудовою маршрутів для певної групи агентів. Такий варіант зручно використовувати у різних модифікаціях задачі комівояжера. Інший метод декомпозиції задачі ґрунтується на побудові дорожньої карти переміщення. Він найчастіше використовується при пошуку ланцюгових маршрутів, коли окремі гілки чи підграфи закріплюються за окремими потоками. Більш складним є варіант поєднання обох методів. Існують й інші методи, зокрема, коли в моделі використовують декілька колоній мурах. Прикладом таких задач можуть слугувати задачі дослідження міграційних процесів чи екологічні задачі із декількома джерелами забруднення.

Разом з тим, використання паралельного програмування для дослідження графів, в тому числі в мурашиному алгоритмі, пов'язане з низкою викликів. Одна з найголовніших проблем – це балансування навантаження між різними потоками. Може виникнути ситуація, коли одні потоки постійно завантажені, особливо ті, що обслуговують маршрути близькі до оптимальних, а інші простоюють. В цьому випадку доцільно застосовувати методи розподілу навантаження.

Ще одним важливим моментом потокового програмування є синхронізація роботи потоків. Наприклад, при відкладанні феромону виникає необхідність зміни спільних даних, що може призвести до конфліктів при одночасному оновленні. Тут потрібно використати різні механізми синхронізації.

Задача полягала у знаходженні найкоротшого шляху між стартовою точкою (джерелом) і кінцевою точкою (їжею) в заданому графі, ви-

користовуючи мурашиний алгоритм із можливістю паралельного виконання. При цьому важливо забезпечити дотримання таких умов:

- кожна мураха стартує з однієї і тієї ж вершини;
- усі мурахи діють незалежно одна від одної, але оновлюють загальний феромонний слід;
- враховуються часові обмеження, кількість мурах, параметри феромонного випаровування та підсилення.

Цей підхід дозволяє моделювати реальні задачі, пов'язані з плануванням маршрутів транспорту, дротових мереж або логістичних ланцюгів. Постановка задачі є тим джерелом, з якого витікає весь подальший потік розв'язання, що поступово розгалужується в окремі процедури реалізації.

Впровадження мурашиного алгоритму в програмну систему з підтримкою паралельної обробки дозволило не лише скоротити час обчислень, а й адаптувати алгоритм до умов реального часу, що має критичне значення для промислових і транспортних задач.

Порівняння послідовного та паралельного виконання показало перевагу багатопотоковості при роботі з великими графами. Водночас було виявлено, що надмірна кількість потоків без синхронізації може спричинити неефективність багатопотокового методу.

Модель мурашиної поведінки чітко виділила найкоротший маршрут через поступове накопичення феромонів – подібно до стежки, що формується постійним використанням. Це підкреслило здатність алгоритму до самонавчання.

Динамічне оновлення таблиці кроків кожної мурахи дозволило аналізувати процес у реальному часі, що сприяло глибшому розумінню алгоритму та його вдосконаленню.

Проведено експериментальні дослідження при 2^8 та 2^9 кількості мурах в колонії. Результати досліджень показали ефективність часу алгоритму в 30-40% експериментів.

Висновки. Мурашиний алгоритм у поєднанні з багатопотоковою технологією обробки даних виступає потужним інструментом для розв'язання широкого кола задач. Експериментальні дослідження застосування багатопотокових методів роботи мурашиного алгоритму показав, що час виконання алгоритму в порівнянні з однопотоковим зменшується відсотків на 30-40.

Список використаних джерел:

1. Михайленко Р. М. Паралельні та розподілені обчислення: навч. посіб. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2021. 153 с.
2. Сизько В. А., Бабенко М. В., Лимар Н. М., Госало І. О. Розробка паралельного мурашиного алгоритму на прикладі задачі комівояжера. *Комп'ю-*

- терні науки та інформаційні технології: збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. 2020. С. 105-108.*
3. Тимчук О. С., Проценко Я. А., Парамонов А. І. Застосування алгоритму мурашиної колонії до вирішення задачі декількох комівояжерів без депо. *Системи обробки інформації. 2019. Вип. 3 (158). С. 73-78.*
 4. Худов Г. В., Романенко І. О., Минко П. Є., Соломоненко Ю. С., Іванюк В. О. Удосконалений метод прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму. *Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 2. С. 63-67.*
 5. Штовба С. Д., Рудий О. М. Мурашині алгоритми оптимізації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2004. № 4. С. 62-69.*

SPECIFICS OF THE MULTITHREADED IMPLEMENTATION OF THE ANT COLONY ALGORITHM

This work investigates the specifics and prospects of applying distributed systems principles and parallel programming to the processing of network graph models. The subject of experimental study for its characteristic features is a polynomial bio-inspired ant colony algorithm, based on a metaheuristic approach to modeling ant behavior. The research aims to obtain adequate results for constructing predicted movement trajectories that satisfy optimization conditions.

The motivation for addressing this problem and achieving the work's goal stems from a wide range of applied tasks. These arise both at the regional level, within urban community economic and social development programs, and in promising areas of scientific research. Such areas include planning economic and social development, optimizing transportation, and exploring telecommunication networks and artificial intelligence systems. The research findings can also be used for planning military operations involving the group deployment of various armed forces units, especially when group targets are anticipated.

Employing a heuristic ant colony algorithm to study problems represented as graph models, which are readily amenable to restructuring by multithreaded big data processing methods and tools, offers opportunities for effectively increasing computational speed. This is achieved through high-performance computing approaches, particularly when a large number of permissible routes need simultaneous analysis. This organic combination of the two technologies not only accelerates the computational process of finding the optimal route but also ensures better scalability of the investigated system.

Within this research, the primary focus is on utilizing multithreaded computations. This enables the implementation of a scalable architecture capable of parallel processing a large number of agents in real time.

Key words: *Graph models, Ant Colony Algorithm, Distributed systems and Parallel programming.*

Отримано: 18.06.2025