

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ МОДЕЛЕЙ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

Купін А.І.¹, Косей М.П.¹

¹ Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Анотація. Це дослідження спрямоване на аналіз моделей ройового інтелекту та їхньої ролі у вдосконаленні мультиагентних систем. У роботі розглянуто ключові наукові досягнення у цій галузі, а також окреслено тенденції розширення сфери їхнього практичного застосування.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальний агент, мультиагентні системи, ройовий інтелект, алгоритми оптимізації ройового інтелекту, моделі машинного навчання ML.

На сучасному етапі розвитку технологій мультиагентні системи стрімко поширюються у різних наукових і технічних галузях, стаючи одним із визначальних чинників технологічного прогресу. Особливої актуальності ці системи набувають у контексті збройних конфліктів, коли підвищується попит на автономні системи з розвиненим інтелектуальним управлінням, що підкреслює важливість розвитку мультиагентних технологій.

Сьогодні подібні технології активно використовуються у безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Окрім військової сфери, їх застосовують також у агропромисловості, будівництві, пошуково-рятувальних операціях та екологічному моніторингу.

Згідно з дослідженнями [1], ринок військових безпілотників демонструє стрімке зростання: з 14,14 млрд доларів США у 2023 році до 16,7 млрд у 2024 році, а до 2032 року очікується 47,16 млрд доларів зі щорічним приростом у 13,15%.

Провідними гравцями цієї галузі є компанії Lockheed Martin, Northrop Grumman, General Atomics та Boeing. Зростання попиту на військові дрони зумовлене значними інвестиціями, розвитком ринку та широким використанням цих технологій у військових операціях.

Таке стрімке зростання пояснюється сучасними глобальними військовими конфліктами (наприклад, російська агресія проти України з 24 лютого 2022 року або терористичні дії Хамасу проти Ізраїлю з 7 жовтня 2023 року), а також

швидким прогресом у сфері штучного інтелекту, який спостерігався протягом останніх років.

Формалізовані моделі рою своїм корінням сягають біологічних досліджень 19–20 століть, які аналізували колективну поведінку тварин. У першій половині 20-го століття були створені перші математичні моделі, наприклад, динаміка популяцій Лотки-Вольтерри. Важливий поштовх для розвитку цих моделей відбувся у другій половині століття завдяки появі комп'ютерів, що дали змогу симулювати складні системи. Сучасні моделі рою ґрунтуються на поєднанні спостережень за природними системами, математичного аналізу та новітніх технологій.

Сьогодні у моделюванні рою виділяють два принципово різні підходи [2]:

- просторовий (spatial);
- непросторовий (nonspatial).

У непросторових моделях динаміка рою описується через частотний розподіл груп агентів різного розміру. При цьому допускаються процеси об'єднання чи поділу груп залежно від динаміки взаємодій, умов середовища та внутрішніх характеристик. Основним недоліком такого підходу є потреба у введенні численних припущень для опису трансформацій груп, що може знижувати точність моделювання.

Просторові моделі враховують простір явно або неявно.

Вони поділяються на:

- індивідуально-орієнтовані моделі (лагранжеві, Lagrangian), які базуються на описі руху кожного агента окремо;
- континуальні моделі (ейлерові, Eulerian), в яких рій розглядається як континуум, що описується через густину чи концентрацію популяції. Поведінка рою моделюється через рівняння в частинних похідних, що дозволяють аналізувати його динаміку в одно-, дво- або тривимірному просторі.

Моделювання ройової динаміки в рамках індивідуально-орієнтованої концепції здійснюється через взаємодію двох типів сил:

- притягування на великих відстанях, наприклад у риб воно базується на зоровій інформації,

- відштовхування на коротких відстанях, яке виникає через тиск або коливання води, виявлені органом чуття (бічною лінією риби).

Для моделювання динаміки рою із застосуванням континуального підходу також популярними є стохастичні марковські моделі [3]. Вони дозволяють описати еволюцію системи через ймовірнісний розподіл її станів, що дає змогу враховувати динамічну змінність поведінки рою та адаптацію до умов середовища.

В індивідуально-орієнтованому підході широко використовуються моделі, засновані на теорії графів [4], де агенти моделюються як вузли графа, а їх взаємодії — як ребра. Такий підхід дозволяє описувати структуру рою через топологію графа, забезпечуючи зручний інструмент для аналізу складних взаємодій між агентами.

Одним із ключових понять у теорії графів є кістякове дерево — підграф, який охоплює всі вершини початкового графа та не містить циклів. Кістякове дерево забезпечує мінімальну зв'язність графа, тобто гарантує існування шляху між будь-якими двома вершинами, що є важливим для координації агентів у рої.

Модель рою, заснована на теорії графів, описана в роботі [4], розглядає рій як інформаційну мережу, де кожен агент є вузлом графа, а інформаційні зв'язки між агентами представляються ребрами. Така топологія може бути як статичною, так і динамічною, залежно від умов середовища та завдань, що стоять перед роєм.

У рамках підходу, описаного в [4], розглядаються два основні способи управління багатоагентними системами: на основі вузлів (node-based), де аналізується стан кожного агента окремо, та на основі ребер (edge-based), де оцінюється відносний стан між парами агентів.

Автор роботи [4] надає перевагу підходу, заснованому на ребрах (edge-based), оскільки він ефективніше враховує ключові обмеження: мінімальну відстань між агентами для уникнення зіткнень, максимальну відстань для підтримки зв'язності, а також обмеження поля зору, яке визначає можливість взаємодії тільки між агентами в межах видимості.

Цей підхід також дозволяє спрощено аналізувати стійкість системи та краще підходить для практичного застосування, оскільки використовує відносні вимірювання між агентами, що спрощує технічну реалізацію алгоритмів управління роями.

У статті [5] представлена модель управління групою агентів, яка базується на вимірюванні та контролі ентропії системи. Модель передбачає два ключові режими роботи: коли значення ентропії перевищує встановлений поріг, агенти автоматично формують більш компактную групу для зниження загального рівня ентропії; після досягнення прийнятного рівня ентропії (нижче порогового значення) група агентів переходить до виконання основного завдання, спрямовуючись до поставленої мети.

Концепція ентропії, яка застосовується для взаємодіючих груп агентів, сприяє створенню ефективної системи управління їх формацією. У даному дослідженні використовується спеціальний різновид ентропійної міри, а саме ентропія Цалліса, яка дозволяє оцінювати й контролювати рівень впорядкованості рою та забезпечувати масштабованість і надійність у роботі групи агентів.

Ще одним підходом до моделювання рою є концепція холонічних мультиагентних систем (HMAS - Holonic Multi-Agent System) [6].

Холон, згідно з визначенням Артура Кестлера, є структурою, яка одночасно виступає як ціле і як частина більшого цілого. Холони можуть містити в собі інші холони, відповідаючи трьом основним принципам: стабільність, автономність і здатність до співпраці.

Ієрархічна структура холонічних мультиагентних систем дозволяє моделювати системи на різних рівнях деталізації залежно від поставлених цілей або доступних обчислювальних ресурсів. Така ієрархія, яка складається з вкладених один в одного холонів, називається холархією і забезпечує гнучкість та адаптивність моделювання.

Цікаве застосування теорії хаосу описано у статті [7]. Дослідження було проведено в рамках проєкту ASIMUT (Aid to Situation Management based on

Multimodal, MultiUAVs, Multilevel acquisition Techniques), що підтримується Європейським оборонним агентством (EDA - European Defence Agency).

Проект ASIMUT використовує ієрархічну структуру рою, що складається з двох рівнів координації: рою вищого рівня координації (HLCS - High Level Coordination Swarm), який відповідає за загальне управління роєм, та рою нижчого рівня (LLCS - Low Level Coordination Swarm), що виконує локальні завдання, такі як спостереження і збір інформації.

Автори статті [7] мали на меті зробити рух дронів непередбачуваним для потенційного противника, тому для моделювання були використані хаотичні динамічні моделі, які забезпечують складність прогнозування траєкторій.

У дослідженні було використано три основні моделі:

- MAMM (Ma Mobility Model): базова модель, яка продемонструвала низьку ефективність через повторювані петлі та часті повороти в траєкторіях дронів.
- MAMM2: вдосконалена версія MAMM із модифікованим розподілом поворотів, що дозволило зменшити кількість різких маневрів і поліпшити плавність руху.
- CROMM (Chaotic Rössler Mobility Model): найефективніша модель, заснована на системі Рьосслера, яка була інтегрована з хаотичним алгоритмом мурашиної колонії (CACO — Chaotic Ant Colony Optimization).

Ці моделі забезпечують непередбачуваність руху дронів, що значно ускладнює їх прогнозування потенційним противником. Особливо модель CROMM, завдяки поєднанню хаотичних траєкторій із оптимізаційними алгоритмами, демонструє високу ефективність у контексті військових і розвідувальних операцій.

Висновки. Проведений аналіз показав, що вибір моделі ройового інтелекту для подальших досліджень залежить від специфіки задачі. Індивідуально-орієнтовані моделі підходять для детального моделювання взаємодій між агентами, тоді як континуальні моделі краще описують глобальну динаміку великих роїв. Графові моделі ефективні для врахування зв'язності та взаємодій між агентами, а ентропійні підходи забезпечують

адаптацію форми рою до динамічних змін середовища. Хаотичні моделі, наприклад CROMM, демонструють високу ефективність там, де потрібна непередбачуваність руху.

Таким чином, вибір моделі має здійснюватися з урахуванням вимог до системи та її функціональних характеристик. У багатьох випадках оптимальним рішенням є використання гібридних моделей, які інтегрують переваги різних підходів для досягнення високої ефективності, адаптивності та точності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Military Drone Market Size, Share & Russia-Ukraine War Impact Analysis. Forecast, 2024-2032 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 23.12.2024)
2. Veysel Gazi, Kevin M. Passino (The Ohio State University, 2002) - Stability analysis of swarms. URL: https://www.researchgate.net/publication/3031441_Stability_analysis_of_swarms (дата звернення: 20.12.2024).
3. Kristina Lerman, Aram Galstyan, Tad Hogg (USC Information Sciences Institute, Hewlett-Packard - 2004 Labs) - Mathematical Analysis of Multi-Agent Systems URL: https://www.researchgate.net/publication/1957056_Mathematical_Analysis_of_Multi-Agent_Systems (дата звернення: 20.12.2024)
4. Esteban Restrepo(Automatic. Université Paris-Saclay, 2021) - Coordination control of autonomous robotic multi-agent systems under constraints. URL: <https://theses.hal.science/tel-03537341v1> (дата звернення: 20.12.2024)
5. Luke Fina, Douglas Shane Smith, Jr., Jason Carnahan and Hakki Erhan Sevil (Mechanical Engineering, Intelligent Systems & Robotics, University of West Florida; I3, Huntsville - 2022) - Entropy-Based Distributed Behavior Modeling for Multi-Agent UAVs. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/7/164> (дата звернення: 25.01.2025)
6. Igor Tchappi, Jean Etienne Ndamlabin Mboula, Amro Najjar, Yazan Mualla, Stephane Galland (University of Luxembourg, Inria Nancy – Grand Est, Luxembourg Institute of Science and Technology, Univ. Bourgogne-Franche-Comté - 2022) URL: https://www.researchgate.net/publication/360670873_A_Decentralized_Multilevel_Agent-Based_Explained_Model_for_Fleet_Management_of_Remote_Drones(дата звернення 26.01.2025)
7. Martin Rosalie, Grégoire Danoy, Serge Chaumette, Pascal Bouvry (University of Luxembourg, University of Bordeaux - 2019) Chaos-enhanced mobility models. URL: <https://hal.science/hal-01699298/file/asimut.pdf> (дата звернення: 28.01.2025)

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROMISING MODELS OF SWARM INTELLIGENCE

Kupin Andrey, Kosei Maksym

Abstract. *This study is focused on the analysis of swarm intelligence models and their role in improving multi-agent systems. The paper examines key scientific achievements in this field and outlines trends in expanding the scope of their practical application.*

Keywords: *artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent systems, swarm intelligence, swarm intelligence optimization algorithms, machine learning models, ML.*

REFERENCES

1. Military Drone Market Size, Share & Russia-Ukraine War Impact Analysis. Forecast, 2024-2032 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 23.12.2024)
2. Veysel Gazi, Kevin M. Passino (The Ohio State University, 2002) - Stability analysis of swarms. URL: https://www.researchgate.net/publication/3031441_Stability_analysis_of_swarms (дата звернення: 20.12.2024).
3. Kristina Lerman, Aram Galstyan, Tad Hogg (USC Information Sciences Institute, Hewlett-Packard - 2004 Labs) - Mathematical Analysis of Multi-Agent Systems URL: https://www.researchgate.net/publication/1957056_Mathematical_Analysis_of_Multi-Agent_Systems (дата звернення: 20.12.2024)
4. Esteban Restrepo(Automatic. Université Paris-Saclay, 2021) - Coordination control of autonomous robotic multi-agent systems under constraints. URL: <https://theses.hal.science/tel-03537341v1> (дата звернення: 20.12.2024)
5. Luke Fina, Douglas Shane Smith, Jr., Jason Carnahan and Hakki Erhan Sevil (Mechanical Engineering, Intelligent Systems & Robotics, University of West Florida; I3, Huntsville - 2022) - Entropy-Based Distributed Behavior Modeling for Multi-Agent UAVs. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/7/164> (дата звернення: 25.01.2025)
6. Igor Tchappi, Jean Etienne Ndamlabin Mboula, Amro Najjar, Yazan Mualla, Stephane Galland (University of Luxembourg, Inria Nancy – Grand Est, Luxembourg Institute of Science and Technology, Univ. Bourgogne-Franche-Comté - 2022) URL: https://www.researchgate.net/publication/360670873_A_Decentralized_Multilevel_Agent-Based_Explained_Model_for_Fleet_Management_of_Remote_Drones(дата звернення 26.01.2025)
7. Martin Rosalie, Grégoire Danoy, Serge Chaumette, Pascal Bouvry (University of Luxembourg, University of Bordeaux - 2019) Chaos-enhanced mobility models. URL: <https://hal.science/hal-01699298/file/asimut.pdf> (дата звернення: 28.01.2025)