

УДК 004.75:004.738.5

МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ КООПЕРАТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ ЦІЛЕЙ ДЛЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

Кравцов М.І.

e-mail: mark.kravtsov@nure.ua

Науковий керівник – д.т.н., проф. Аксак Н.Г.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ІСТ
м. Харків, Україна

The paper addresses the problem of QoS criteria conflict in multi-agent cooperative routing, caused by the inconsistency of quality metrics and the autonomy of agents, which gives the problem the nature of multi-criteria compromise optimization with the formation of a set of Pareto-efficient solutions.

A three-level hierarchical goal structure GGG is proposed to align agents' local actions with the global strategy through prioritized SLA compliance, maintenance of network stability, and optimization of resource utilization efficiency.

The hierarchy is formalized as a graph and integrated with hierarchical reinforcement learning via the options framework, providing a structured resolution of QoS criteria conflicts in a multi-agent environment.

Актуальність. У мультиагентних системах управління трафіком виникає структурний конфлікт між суперечливими QoS-критеріями (затримка, втрати, енергоспоживання, надійність), оскільки жоден маршрут не здатен одночасно оптимізувати всі показники, що призводить до формування множини Парето-ефективних альтернатив. Автономність агентів, локальність інформації та конкуренція за спільні ресурси поглиблюють цей конфлікт. Через NP-складність задачі багатокритеріальної маршрутизації та експоненційне зростання кількості Парето-рішень застосування точних алгоритмів у реальних системах неможливе, що зумовлює необхідність розробки ієрархічних моделей прийняття рішень і використання підкріплювального навчання для узгодження локальних інтересів агентів із глобальними вимогами до стійкості та якості функціонування мережі.

У мультиагентній кооперативній маршрутизації існує структурний конфлікт між сукупністю кількісно вимірюваних характеристик мережевого або обчислювального сервісу – QoS-критеріями (QoS – Quality of Service), які визначають рівень якості його надання користувачеві або застосунку, що проявляється у відсутності єдиного оптимального маршруту та потребує ієрархічної декомпозиції цілей для забезпечення стабільної колективної поведінки агентів [1, 2].

Конфлікт критеріїв QoS виникає через те, що множина допустимих маршрутів не містить рішення, здатного одночасно оптимізувати всі суперечливі показники якості обслуговування. Проблема конфлікту критеріїв QoS у мультиагентній системі набуває особливої гостроти через саму природу розподіленого управління. Оскільки кожен агент функціонує на основі локальних цілей, має лише часткову інформацію про стан мережі та діє автономно, це породжує подвійний рівень суперечностей. Перший рівень стосується безпосередньо критеріїв якості обслуговування, таких як затримка, енергоспоживання та надійність, які часто є взаємовиключними і не можуть бути одночасно оптимізовані в межах єдиного маршруту. Другий рівень виникає внаслідок взаємодії самих агентів: коли один агент оптимізує власний трафік, його дії можуть призвести до перевантаження спільних мережевих вузлів, що неминуче погіршує показники QoS для інших агентів. Локальна оптимізація агентом одного з критеріїв неминуче призводить до погіршення глобальних характеристик функціонування всієї мережі, що надає задачі характеру багатокритеріальної компромісної оптимізації з формуванням множини Парето-ефективних рішень. Для розв'язання цієї суперечності необхідним є впровадження ієрархії цілей, яка забезпечує узгодження локальних інтересів окремих агентів із глобальними вимогами до якості обслуговування в корпоративній мережі.

Ієрархія цілей у мультиагентному управлінні трафіком потрібна для подолання конфлікту критеріїв QoS через структурування завдань. Вона включає три рівні: глобальний (стійкість мережі), тактичний (затримка, балансування, енергоспоживання) та операційний (локальний вибір маршрутів агентами). Така структура дозволяє пріоритезувати критерії, адаптувати їх ваги та узгоджувати локальні дії з глобальними цілями. Теоретична складність задачі багатокритеріальної маршрутизації полягає в тому, що вона належить до класу NP-важких проблем, оскільки кількість Парето-оптимальних рішень зростає експоненційно зі збільшенням розміру мережі, що унеможливорює застосування точних методів для реальних масштабів і зумовлює необхідність використання евристичних алгоритмів або підходів на основі навчання з підкріпленням та аукціонних механізмів.

Запропонована ієрархічна структура цілей для мультиагентної системи управління трафіком базується на трирівневому дереві цілей G , де коренева мета g_0 полягає у забезпеченні кооперативної маршрутизації з гарантіями QoS та стійкістю мережі. На першому рівні декомпозиції визначаються стратегічні підцілі, впорядковані за пріоритетом: безумовне дотримання SLA (g_1), підтримання стійкості та справедливості розподілу ресурсів (g_2) і лише після цього підвищення енергоефективності та пропускну здатності (g_3). Другий рівень деталізує ці підцілі до операційних метрик: для g_1 це мінімізація

затримки, обмеження втрат пакетів, контроль джитеру та гарантована пропускна здатність; для g_2 – балансування навантаження, запобігання коливанням маршрутизації та забезпечення відмовостійкості; для g_3 – мінімізація енергоспоживання, вартості маршрутів та максимізація сумарної пропускної здатності. Формально дерево цілей описується графом $G=(VG,EG)$, вершини якого відповідають усім рівням ієрархії, а ребра відображають підпорядкування цілей. Така структура безпосередньо інтегрується з ієрархічним підкріплювальним навчанням через механізм опцій, де кожній підцілі ставиться у відповідність опція з власною політикою: на верхньому рівні og_1 реалізує режим гарантування QoS, og_2 забезпечує стабілізацію мережі, og_3 відповідає за оптимізацію ефективності, а листові опції на нижньому рівні визначають конкретні політики маршрутизації для досягнення операційних цілей. Такий підхід дозволяє розв'язати конфлікт критеріїв QoS через ієрархічну декомпозицію та динамічне пріоритезування цілей у багатоагентному середовищі.

Висновки. Виконаний аналіз засвідчив, що конфлікт критеріїв QoS у мультиагентній кооперативній маршрутизації має структурний характер і зумовлений як суперечливістю самих метрик якості обслуговування, так і автономністю прийняття рішень окремими агентами, що надає задачі характеру багатокритеріальної оптимізації з формуванням множини Парето-ефективних рішень та зумовлює її належність до класу NP-важких проблем. Запропонована трирівнева ієрархія цілей дозволяє здійснити декомпозицію глобальної задачі на стратегічні, тактичні та операційні підзадачі з чітким пріоритетним впорядкуванням, а завдяки інтеграції дерева цілей із ієрархічним підкріплювальним навчанням досягається узгодження локальних політик агентів із глобальними вимогами до стійкості мережі. Такий підхід створює основу для адаптивного керування трафіком у корпоративних мережах, що функціонують в умовах динамічного середовища та змінних вимог до якості обслуговування.

Список використаних джерел:

1. Yang, Q., Qu, F., Guo, T., Liu, Y., & Wen, Y. (2025). Augmented Runtime Collaboration for Self-Organizing Multi-Agent Systems: A Hybrid Bi-Criteria Routing Approach. *arXiv preprint arXiv:2512.00740*.
2. Dhandapani, M., Vetrisevi, V., & Aishwarya, R. (2024). *CoopAI-Route: DRL Empowered Multi-Agent Cooperative System for Efficient QoS-Aware Routing for Network Slicing in Multi-Domain SDN*. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(3), 2449–2486.