

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

В данной работе проводилось исследование методов решения задачи мульти коммивояжера, и был предложен новый метод решения этой задачи на основе уменьшения размера пространства решений. Проводился сравнительный анализ предложенного метода с методом из литературы. Критерии оценки качества решения были время расчёта решения, суммарное длина маршрутов и максимальный по длине путь среди коммивояжёров. Предложенный метод превосходил по всем показателям.

Задача мульти коммивояжера; распределение задач; целераспределение; мультиагентные системы; централизованное управление; групповое управление.

Houssein Firas Aimanovich

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CENTRALIZED TASK ALLOCATION IN MULTI-AGENT SYSTEMS*

In this paper, research was carried out on methods for solving the multi-traveling salesman problem, and a new method was proposed for solving this problem based on reducing the size of the solution space. A comparative analysis of the proposed method with a method from the literature was carried out. The criteria for assessing the quality of the solution were the time of calculating the solution, the total length of the routes and the maximum length of the path among traveling salesmen. The proposed method was superior in all respects.

Введение. В последние годы интеллектуальные вычислительные технологии привлекают все больше внимания исследователей. Многие из этих технологий вдохновлены природными явлениями и пытаются использовать преимущества различных аспектов поведения живых организмов на разных уровнях их организации.

Харрат и коллеги [1] предложили гибридный алгоритм AC2OptGA для решения задачи MTSP, комбинируя генетический алгоритм (GA) и муравьиный алгоритм. В этом алгоритме муравьиная колония генерировала решения, а GA улучшал их. Гомес и соавторы [2] применили GA для задачи выбора маршрута транспортных средств (VRP) с целью оптимизации ежедневных маршрутов работников компании в Ковильяне, Португалия, минимизируя стоимость и расстояние.

Акбай и Калайчи [3] разработали решение на основе алгоритма поиска переменных окрестностей для задачи MTSP с учетом сбалансированной стоимости. Они использовали 22 набора данных разных масштабов для своих вычислений. Муньос-Эррера и Сучан [4] исследовали фитнес-ландшафт (FLA) для задач MTSP и CVRP, предложив новую меру FLA для анализа структуры фитнес-ландшафта и взаимосвязей с производительностью алгоритмов.

Сюй и Чжан [5] реализовали гибридный алгоритм сбалансированного MTSP, основанный на генетических алгоритмах и методе локального поиска (two-opt). Хуфи и коллеги [6] провели обзор литературы по задачам оптимизации траектории беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), связанным с задачами коммивояжера и VRP, предоставив обзор методов и показателей производительности.

Перейра и соавторы [7] разработали гибридный алгоритм GABC-LS для решения минимального MTSP, сочетая генетический алгоритм, пчелиный алгоритм и два метода локального поиска (move1-inside и two-opt).

Методика решения задач, основанная на поведении муравьев при поиске пищи (оптимизация колонии муравьев — ACO), доказала свою эффективность в различных задачах оптимизации [8, 9]. Оригинальный ACO был модифицирован для применения в разных областях, таких как задачи назначения, раскраска графов, планирование, проектирование схем, сети связи, биоинформатика и маршрутизация транспортных средств. Были разработаны расширения ACO, такие как элитарная AS [10], Ant-Q [11], Ant Colony System [12], ранговая AS [13], популяционная ACO [14], Beam-ACO [15] и другие. Впоследствии ACO объединяли с другими алгоритмами для

создания гибридных методов с целью улучшения результатов, примеры чего можно найти в работах [16-19].

Объём пространства решений задачи MTSP с n городами и m коммивояжёрами можно вычислить с помощью числа Лаха [20]. Беззнаковые числа Лаха рассчитываются по следующей формуле:

$$L(n, m) = \left(\frac{n!}{m!}\right)^2 * \frac{m}{n(n-m)!} \quad (1)$$

Предложенный метод. Предложенный метод реализуется в несколько этапов:

Шаг 1: Первоначально решается задача коммивояжёра, где предполагается, что количество агентов равно одному. Это позволяет определить оптимальный маршрут, который должен пройти один агент, чтобы посетить все задачи и вернуться в начальную точку.

Шаг 2: После решения задачи коммивояжёра получается оптимальная последовательность выполнения задач. Эта последовательность затем разделяется между несколькими агентами, стараясь распределить задачи между ними как можно более равномерно.

Шаг 3: Далее происходит комбинаторный процесс выбора оптимальных первых и последних задач для каждого агента. Это позволяет определить начальную и конечную точки маршрута для каждого агента таким образом, чтобы минимизировать общее время выполнения всех задач.

Таким образом, этот метод включает в себя два основных алгоритма:

- Алгоритм решения задачи коммивояжёра, который позволяет определить оптимальный маршрут для посещения всех задач и возврата в начальную точку одному агенту.
- Алгоритм разделения решения задачи коммивояжёра на несколько агентов, который распределяет полученный оптимальный маршрут между несколькими агентами, стараясь добиться равномерного распределения задач и оптимального использования ресурсов.

В качестве алгоритма решения задачи коммивояжёра был выбран муравьиный алгоритм - это метаэвристический алгоритм оптимизации, вдохновленный поведением муравьев при поиске пищи. Он используется для решения задачи коммивояжера (TSP) и других задач комбинаторной оптимизации. Основные шаги муравьиного алгоритма при решении задачи коммивояжера можно найти в работе [19].

После нахождения оптимального пути для задачи TSP необходимо разделить его между агентами для решения задачи MTSP. Этот процесс

начинается с формирования матрицы расстояний между всеми городами, включая промежуточные города по маршруту.

Затем рассчитывается примерная длина маршрута (d^*), которую каждый агент должен пройти. Путем перебора городов первого агента находится такой город, расстояние до которого на кусочно-ломаной траектории максимально близко к d^* . Эти города становятся центрами для каждого агента.

Далее каждый следующий агент выбирает город, следующий за последним городом предыдущего агента, и этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут назначены все агенты. Затем рассчитывается и сохраняется сумма длин маршрутов для всех агентов.

Начальный город первого агента изменяется с целью проверки всех возможных решений, после чего сохраняется решение с наименьшей суммой пройденных расстояний.

Таким образом, этот подход минимизирует суммарное расстояние, пройденное всеми агентами, за счет оптимизации решения задачи TSP и равномерного разделения маршрута TSP на сегменты одинаковой длины для каждого агента. Размер пространства возможных решений составляет $(n-1)! + n-1$, где n - количество городов в задаче MTSP.

Результаты и сравнения. Для сравнения используется алгоритм ACO-BMTSP [35], который, как и предложенный метод, базируется на муравьином алгоритме. Оба алгоритма были реализованы на языке программирования Python. количество итераций (itr) составляет 350, количество муравьев (ant) - 80, а коэффициент испарения феромона (ρ) установлен на уровне 0.4. Для исследования были подготовлены три эталонные задачи Eil51, KroA100, KroA150 с 51, 100 и 150 городами последовательно. Для каждой из этих задач были установлены три сценария с 3, 5 и 10 агентами. Каждый сценарий запускался по 100 раз для сбора статистических данных. Критерии оценки результатов включают:

- время расчета решения,
- суммарную длину пройденных агентами путей,
- максимальную длину пути среди всех маршрутов, пройденных агентами.

В таблице выражены преимущества предлагаемого метода в процентах по каждому из критериев оценки, которые рассчитывались следующим образом:

$$advantage_{\%} = \left(1 - \frac{criterion_{proposed}}{criterion_{ACO-BMTSP}} \right) * 100 \quad (2)$$

где $advantage\%$ – преимущества в процентах, $critterion_{proposed}$ – среднее среди 100 экспериментов значения заданного критерия для предлагаемого метода, $critterion_{ACO-BMTSP}$ – среднее среди 100 экспериментов значения заданного критерия для алгоритма ACO-BMTSP.

Таблица 1. Средины выигрыш в процентах по времени (avg_{time}), суммы длины маршрутов (avg_{sum}), максимальный по длине маршрут среди всех агентов (avg_{max}) при использовании предложенного метода для сценариев eil51, KroA100, KroA150.

Задача	Eil51			KroA100			KroA150		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Кол. агентов	3	5	10	3	5	10	3	5	10
avg_{time} (%)	48.26	49.19	41.06	52.78	54.34	47.81	67.27	55.19	49.19
avg_{sum} (%)	6.07	4.84	2.36	12.57	11.58	12.89	19.15	18.62	16.42
avg_{max} (%)	9.22	10.9	9.39	14.22	12.78	13.31	20.25	18.67	17.18

Сравнительный анализ в итоге продемонстрировал, что применение предложенного метода обеспечивает следующие преимущества:

- а) время расчета решения задачи MTSP сокращается в среднем на 52%;
- б) общая длина пройденного пути уменьшается в среднем на 12%;
- в) максимальная длина маршрута среди всех пройденных агентами (неравномерность нагрузки) сокращается в среднем на 14%.

Заключение. В данной работе проводилось исследование методов решения задачи мульти-коммивояжера, и был предложен новый метод, основанный на уменьшении размера пространства решений. Сравнительный анализ показал, что при использовании предложенного метода в среднем:

- Время расчета решения задачи мульти-коммивояжера сокращается на 52%.
- Общая длина пути уменьшается на 12%.
- Дисбаланс нагрузки уменьшается на 14%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Harrath, Y., Salman, A.F., Alqaaddoumi, A., Hasan, H., Radhi, A.* A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem. Arab. J. Basic Appl. Sci. 2019. – С 103–112.

2. *Gomes D.E., Iglésias M.I.D., Proença A.P., Lima T.M., Gaspar P.D.* Applying a Genetic Algorithm to a m-TSP: Case Study of a Decision Support System for Optimizing a Beverage Logistics Vehicles Routing Problem. *Electronics* 2021.
3. *Akbay M.A., Kalayci C.B.* A Variable Neighborhood Search Algorithm for Cost-Balanced Travelling Salesman Problem. In *Proceedings of the Metaheuristics Summer School, Taormina, Italy, 2018*.
4. *Muñoz-Herrera S., Suchan K.* Constrained Fitness Landscape Analysis of Capacitated Vehicle Routing Problems. *Entropy* 2022. – C 53.
5. *Xu H.L., Zhang C.M.* The research about balanced route MTSP based on hybrid algorithm. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2009*; – C. 533–536.
6. *Khoufi I., Laouiti A., Adjih C.* A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles. *Drones* 2019. – C. 66.
7. *de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B.* A Hybrid Approach GABC–LS to Solve MTSP. In *Proceedings of the Optimization, Learning Algorithms and Applications, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022*; – C. 520–532.
8. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization. *IEEE Comput. Intell. Mag.* 2006. – C 28–39.
9. *Zhan S.C., Xu J., Wu J.* The optimal selection on the parameters of the ant colony algorithm. *Bull. Sci. Technol.* 2003. – C. 381–386.
10. *Dorigo M.* Optimization, Learning and Natural Algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1992.
11. *Gambardella L.M., Dorigo M.* Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In *Machine Learning Proceedings 1995*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1995. – C. 252–260.
12. *Dorigo M., Gambardella L.M.* Ant colonies for the travelling salesman problem. *Biosystems* 1997. – C. 73–81.
13. *Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C.* A New Rank Based Version of the Ant System—A Computational Study. *Cent. Eur. J. Oper. Res.* 1999. – C. 25–38.
14. *Gunttsch M., Middendorf M.* A population based approach for ACO. In *Proceedings of the Workshops on Applications of Evolutionary Computation, Kinsale, Ireland, 3–4 April 2002*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002; – C. 72–81.
15. *Blum C.* Theoretical and Practical Aspects of Ant Colony Optimization; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2004; Volume 282.

16. Хуссейн Ф. А., Финаев В. И. Исследование эффективности алгоритма искусственных потенциалов, муравьиного алгоритма и их комбинации при планировании траектории движения мобильного робота. Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2020), 2020. – С. 39-48.
17. Huang K.L., Liao C.J. Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem. *Comput. Oper. Res.* 2008, – С. 1030–1046.
18. Xiao J., Li L. A hybrid ant colony optimization for continuous domains. *Expert Syst. Appl.* 2011. – С. 11072–11077.
19. Rahmani R., Yusof R., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S. Hybrid technique of ant colony and particle swarm optimization for short term wind energy forecasting. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 2013. – С. 163–170.
20. Lah Ivo A new kind of numbers and its application in the actuarial mathematics. *Boletim do Instituto dos Actuários Portugueses.* 1954. – С. 7–15.
21. de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B. Ant-Balanced Multiple Traveling Salesmen: ACO-BMTSP. *Algorithms* 2023, – С. 37.

Хуссейн Фирас Айманович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firmas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

Houssein Fieas Aimanovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: firmas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: 89996379357; junior researcher.