

19. Kostyukov V.A., Medvedev M.YU., Maevskiy A.N., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V. Optimizatsiya form geometrii rastruba vetroenergeticheskoy ustanovki tipa "Rotor v rastrube" [Optimization of the geometry forms of the bell of a wind turbine of the "Rotor in a bell" type], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2017, Vol. 17, No. 4 (91), pp. 61-68.
20. Poluyanovich N.K., Azarov N.V., Dubyago M.N. Neyrokomп'yuternoe upravlenie propusknoy sposobnost'yu kabel'nykh setey posredstvom ucheta i kontrolya ikh parametrov [Neurocomputer control of the bandwidth of cable networks by means of accounting and control of their parameters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 84-103.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Светличный Никита Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79886668272; кафедра электротехники и мехатроники; бакалавр.

Качелаев Олег Вадимович – Южный федеральный университет; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281163960; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: w_m88@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the Department of Electric Technics and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Svetlichnyi Nikita Igorevich – Southern Federal University; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79886668272; the Department of Electric Technics and Mechatronics; undergraduate student.

Kachelaev Oleg Vadimovich – Southern Federal University; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281163960; the Department of Techno-Sphere Safety and Chemistry; postgraduate student.

Dubyago Marina Nikolaevna – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281758225; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007:51

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-144-155

Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ

Рассматривается задача целераспределения в рамках многоагентной системы, где каждый агент представляется автономным роботом, а каждая задача соответствует позиции в двухмерной среде, которую должен посетить один из агентов. Эта задача по своей сути схожа с многоагентной версией классической задачи коммивояжера, где вместо одного участника задействуется несколько агентов. Каждый из них должен пройти уникальный маршрут, охватывающий определённое множество городов. В связи с этим проводится исследование многоагентной задачи коммивояжера как одного из форматов постановки задачи целераспределения. Эта задача имеет большое значение в области маршрутизации и оптимального распределения задач. Её решение включает две тесно связанные подзадачи: определение набора точек, закрепляемых за каждым агентом, и построение оптимального маршрута их посещения. В научной литературе представлены три основных подхода к решению этой задачи: подход одновременной оптимизации, при котором обе подзадачи решаются совместно; подход Cluster-First, Route-Second, где сначала распределяются города между агентами, а затем определяется порядок посещения городов каждого агента; подход Route-First, Cluster-Second, предполагающий изначальную оптимизацию порядка посещения всех городов с последующим его делением между агентами без изменения порядка посещения. В данной работе предлагается гибридный метод, сочетающий элементы подходов Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second. Цель – объединить сильные стороны обеих подходов и избавиться от их недостатков. Для проверки эффективности разработанного метода проведено сравнительное исследование с методами, реализующие подходов Cluster-First,

Route-Second и Route-First, Cluster-Second. Оценка проводилась по трём основным метрикам: время, затраченное на построение решения, суммарная длина всех маршрутов, а также максимальная длина маршрута среди всех агентов. Результаты экспериментов показали, что применение предложенного метода позволяет сократить максимальную длину маршрута (тем самым снизить дисбаланс нагрузки между агентами) в среднем на 26%.

Многоагентная задача коммивояжера; распределение задач; целераспределение; многоагентные системы; централизованное управление; групповое управление.

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF TASK ALLOCATION IN A MULTI-AGENT SYSTEM

This paper considers the problem of task distribution within a multi-agent system, where each agent is an autonomous robot, and each task corresponds to a point in a two-dimensional environment that one of the agents must visit. This problem is essentially similar to a multi-agent version of the classical traveling salesman problem, where several agents are involved instead of one participant. Each of them must go through a unique route covering a certain set of points. In this regard, a study of the multi-agent traveling salesman problem is conducted as one of the formats for setting the problem of distributing goals among agents. This problem is of great importance in the field of routing and optimal task distribution. Its solution includes two closely related subproblems: determining the set of points assigned to each agent and constructing the optimal route for visiting them. There are three main approaches to solving this problem in the scientific literature: Optimization approach, where both subproblems are solved jointly; Cluster-First, Route-Second model, where tasks are first distributed among agents, and then routes are built; The Route-First, Cluster-Second model assumes initial optimization of the route for all points with its subsequent division between agents without changing the order of visits. In this paper, a hybrid method is proposed that combines elements of the Cluster-First, Route-Second and Route-First, Cluster-Second approaches. The goal is to combine the strengths of both concepts and minimize their drawbacks. To test the effectiveness of the developed method, a comparative study was conducted. The evaluation was carried out according to three main metrics: the time spent on constructing a solution, the total length of all routes, and the maximum route length among all agents. The experimental results showed that the use of the proposed method allows for a reduction in the maximum route length (thereby reducing the load imbalance between agents) by an average of 26%.

Multi-travelling salesman problem; task distribution; goal allocation; multi-agent systems; centralized control; group control.

Введение. Многоагентные роботизированные системы представляют собой коллективы автономных роботов, способных координировать свои действия для достижения общей цели. Они используются в самых разных областях – от промышленности и логистики до сельского хозяйства, медицины и военных задач. Главная особенность таких систем – это способность каждого робота-агента действовать независимо, адаптируясь к изменяющимся условиям среды и сотрудничая с другими агентами для более эффективного выполнения задач. В связи с расширением сферы применения групп роботов, выполняющих единую миссию, возникает необходимость осуществления группового управления робототехническими комплексами (РТК) – элементами этих групп. Среди важнейших проблем, подлежащих осмыслению и решению для реализации такого управления, можно выделить проблему оптимального распределения задач и балансировки нагрузки. Распределение задач между роботами и балансировка рабочей нагрузки имеют решающее значение для оптимизации производительности и использования ресурсов. Эффективные алгоритмы распределения задач необходимы для учета таких факторов, как возможности робота, требования к задаче, приоритет, близость к задаче и текущая рабочая нагрузка. Методы балансировки нагрузки необходимы для равномерного распределения задач между роботами, избегая ситуаций, когда одни роботы перегружены, а другие недогружены.

Когда каждый агент должен выбирать актуальную для выполнения задачу из набора нескольких задач, возникает не только проблема оптимального распределения задач между агентами, но и нахождения оптимальной последовательности выполнения задач для каждого агента. Таким образом проблема множественного распределения задач сводится к многоагентной задаче коммивояжера (МКВ) (Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP).

Многоагентная задача коммивояжёра (МКВ) состоит из двух взаимозависимых подзадач: назначение задач (или городов) отдельным коммивояжёрам, определение оптимального порядка выполнения этих задач каждым коммивояжёром. В научной литературе выделяют три ключевых подхода к решению МКВ, различающихся стратегией разбиения и маршрутизации: Метод совместной оптимизации, Подход "Сначала кластеризация, потом построение маршрутов" (Cluster-First, Route-Second, CFRS), Подход "Сначала построение маршрута, затем разбиение" (Route-First, Cluster-Second, RFCS)

В рамках первого подхода решения многоагентной задачи коммивояжёра (МКВ) обе её составляющие – распределение задач между агентами и построение маршрутов – решаются одновременно. В соответствующих подходах используются алгоритмы или метаэвристики, которые параллельно определяют, какому агенту назначается та или иная задача и в каком порядке он будет её выполнять. Подход одновременной оптимизации охватывает широкий спектр методов, которые можно условно разделить на несколько категорий: детерминированные, метаэвристические, рыночные и др.

В [1] рассматривалась МКВ с неоднородными транспортными средствами. Авторы предложили формулировку задачи в виде задачи целочисленного линейного программирования (ILP) и разработали адаптивный алгоритм ветвей и границ. Это позволило получить приближённое решение в течение 300 секунд на примере с 100 целями и 5 агентами.

В другом исследовании [2] применялось программирование с ограничениями (CP) с использованием глобальных ограничений, интервальных переменных и алгоритмов фильтрации доменов. Однако, несмотря на теоретическую строгость, метод оказался ресурсоёмким: на задачу с 51 точкой и 3 агентами потребовалось более двух часов вычислений.

Авторы работ [3, 4] предложили решения на базе генетических алгоритмов, исследовав влияние различных операторов кроссовера: циклического (CX), частично согласованного, упорядоченного (OX), рекомбинации рёбер (ERX), с чередованием позиций (AEX) и последовательного конструктивного (SCX).

В исследовании [5] задача распределения целей между несколькими беспилотными подводными аппаратами была сведена к МКВ. Целевой функцией служила минимизация общей длины маршрутов и суммарных углов поворота, что позволяет снизить энергозатраты. Решение включало два этапа: на первом определялось количество целей для каждого аппарата, на втором применялась модифицированная система Multiple Ant Colonies System (MACS) для многокритериальной оптимизации. Экспериментальные результаты показали, что этот подход превосходит классическую систему ACO. В целом, подход одновременной оптимизации позволяет получить решения высокого качества, однако это достигается за счёт значительных вычислительных затрат.

Второй подход (CFRS) представляет собой двухэтапную стратегию. На первом этапе выполняется кластеризация, то есть задачи (города) распределяются между коммивояжёрами. На втором этапе для каждого агента решается отдельная задача коммивояжёра (KB) – определяется оптимальный порядок посещения закреплённых за ним городов с учётом минимизации выбранного критерия качества. Таким образом, подход CFRS позволяет декомпозировать исходную МКВ на несколько более простых задач KB, что существенно снижает размерность пространства поиска решений [6–8]. Этот подход часто применяется для повышения эффективности эвристических алгоритмов, особенно в случае задач большого масштаба.

Одним из первых исследований, в котором было предложено использовать методы кластеризации в рамках решения МКВ, стала работа [9]. В ней авторы применили схему аттрактора соседства, комбинируя её с различными эвристиками – включая алгоритм сжатия и методы эволюционных вычислений. Эти гибридные подходы были протестированы на трёх разных задачах, и полученные результаты заложили основу нового направления в решении задач МКВ. С тех пор в ряде исследований разрабатывались комбинированные методы, объединяющие кластеризацию с одним или несколькими эвристическими алгоритмами маршрутизации.

Хотя подход CFRS позволяет значительно сократить время вычислений за счёт разбиения на подзадачи, он имеет и определённые ограничения. В частности, ему не присущ встроенный механизм оптимизации по критерию MinMax, что реализует третий подход (RFCS), основанная на следующей стратегии: сначала формируется единый маршрут,

охватывающий все города задачи – так называемый супер-маршрут. После этого маршрут делится между несколькими агентами без изменения порядка следования городов. Таким образом, исходная МКВ сводится к решению одной задачи коммивояжёра (КВ). Данный подход известен в литературе как Route-First, Cluster-Second (RFCS) [10–12]. Изначально он применялся в задачах маршрутизации транспортных средств (VRP), где дополнительно учитываются параметры вместимости и грузоподъёмности, в отличие от классической МКВ.

В работе [13] представлен интересный пример реализации этого подхода. Автор использовал алгоритм Беллмана, применимый к направленным ациклическим графам, для эффективного разбиения супер-маршрута. Суть алгоритма сводится к следующему: два вложенных цикла (с индексами i и j) последовательно проверяют все подпоследовательности вида $(T_i, T_{i+1}, \dots, T_j)$, вычисляя для каждой из них стоимость маршрута и совокупную нагрузку. Если нагрузка превышает допустимый предел, соответствующий отрезок исключается из рассмотрения. Как и первый подход, RFCS обладает высокой потенциальной точностью, так как позволяет решать задачу оптимально. Однако это сопровождается существенными вычислительными затратами, особенно при увеличении числа городов: при n задачах пространство решений составляет $(n-1)!$.

Легко видеть, что подход RFCS предоставляет более гибкий механизм оптимизации по критерию MinMax, так как деление маршрута может учитывать баланс нагрузки между агентами. Тем не менее, высокая вычислительная сложность ограничивает его применимость в случае крупномасштабных задач.

Проведённый анализ показал, что подход Route-First, Cluster-Second (RFCS) с предложенной модификацией демонстрирует лучшие результаты по критерию максимальной длины маршрута, что способствует более равномерному распределению нагрузки между агентами. Однако, основным недостатком данного подхода является высокая вычислительная сложность по сравнению с подходом Cluster-First, Route-Second (CFRS). Это объясняется тем, что при использовании RFCS муравьиный алгоритм работает в пространстве решений размером $(n-1)!$, где n — общее количество задач. В то же время, при CFRS, где задачи предварительно распределяются между m агентами, размер пространства решений составляет приблизительно $(n/m)!$, что значительно сокращает вычислительные затраты. С увеличением размера пространства решений снижается вероятность нахождения оптимального решения с помощью эвристического метода (например, муравьиного алгоритма), и возрастает риск выхода за рамки локального минимума, что дополнительно увеличивает время расчёта. В связи с этим, в данной работе предлагается гибридный метод, который объединяет достоинства обеих подходов – RFCS и CFRS, чтобы одновременно:

- ◆ сохранить балансировку маршрутов между агентами;
- ◆ сократить время вычислений за счёт сокращения размерности поиска;
- ◆ минимизировать влияние локальных минимумов за счёт комбинированной структуры алгоритма.

Предложенный метод нацелен на достижение оптимального компромисса между качеством решения и его вычислительной эффективностью, что особенно важно для применения в миссиях с большим числом агентов и задач.

Метод Cluster, Route, Connect, Split. представляет собой гибридный метод, сочетающий сильные стороны двух известных подходов:

- ◆ Cluster-First, Route-Second (CFRS) – позволяет сократить пространство решений путём предварительного распределения задач;
- ◆ Route-First, Cluster-Second (RFCS) – обеспечивает эффективную балансировку нагрузки между агентами за счёт оптимизации маршрута целиком.

Алгоритм реализации предлагаемого метода состоит из четырёх ключевых этапов, указываемых ниже.

1. Кластеризация (Cluster). На этом этапе задачи (города) распределяются на кластеры. Цель – уменьшить размер пространства решений за счёт локализации маршрутов. Для кластеризации используется алгоритм K-Means [14] с числом кластеров, равным 4, что предварительно определено как разумный компромисс между качеством решения и временем вычислений.

2. Маршрутизация (Route). Для каждого полученного кластера строится внутренний маршрут с использованием муравьиного алгоритма [15] или других эвристических методов. Это позволяет предварительно оптимизировать маршруты внутри кластеров.

3. Соединение (Connect) После маршрутизации необходимо объединить кластеры в единый маршрут. Для этого в каждом кластере выбираются два узла, которые будут соединяться с соседними кластерами. Предлагаемая эвристика: для каждого кластера определяются два ближайших узла к соседним кластерам, минимизируя суммарную длину соединений.

4. Разделение (Split) Сформированный супермаршрут разбивается на подмаршруты, каждый из которых начинается и заканчивается в депо, и закрепляется за конкретным агентом (коммивояжёр). При разбиении учитываются такие факторы, как: балансировка нагрузки между агентами, ограничение на максимальную длину маршрута, равномерность распределения задач. Подробное описание алгоритма разбиения приведено в работе [16].

Таким образом, суть предложенного метода заключается в объединении структурной эффективности CFRS (снижение размерности задачи) с оптимизационной гибкостью RFCS (снижение дисбаланса маршрутов). Это позволяет достичь высокого качества решений при приемлемом времени вычислений, особенно на больших экземплярах задач МКВ.

Для реализации предлагаемого метода необходимо последовательно решить ряд вспомогательных задач, каждая из которых оказывает существенное влияние на качество и эффективность итогового маршрута. В частности, требуется определить параметры и механизмы, обеспечивающие корректную работу всех этапов алгоритма. На первом этапе требуется ответить на следующие ключевые вопросы.

1. Сколько кластеров следует формировать при кластеризации городов?

Выбор количества кластеров напрямую влияет на размер подзадач маршрутизации. Определение оптимального числа кластеров необходимо для достижения компромисса между качеством решения и временем его вычисления.

Для анализа взаимосвязи между временем расчета и качеством решения (в терминах суммарной длины маршрута и максимальной длины маршрута среди агентов – MinMax) в зависимости от количества кластеров и числа агентов были использованы три классические задачи из библиотеки TSPLIB: *eil51*, *kroA100* и *kroA150*, содержащие 51, 100 и 150 городов соответственно. Для каждой из этих задач были рассмотрены три сценария с различным количеством коммивояжеров: 3, 5 и 10 агентов. В каждом сценарии проводились вычисления при количестве кластеров от 2 до 10. Для получения статистически значимых результатов каждый случай запускался по 100 раз, после чего усреднялись значения целевых метрик. На основании полученных данных можно заключить, что разделение на 4 кластера является хорошим приближением к оптимальному компромиссу между качеством решения и вычислительными затратами, что делает этот параметр предпочтительным для применения в предлагаемом методе.

2. Каким образом следует соединять кластеры между собой для формирования супермаршрута?

Необходимо определить стратегию выбора узлов на границе кластеров, которые будут использоваться для их соединения. Эти узлы должны минимизировать стоимость объединения маршрутов и обеспечивать логичное построение супермаршрута.

Для определения этих узлов предлагается исследовать следующую эвристику: определить ближайшие друг к другу 2 узла соседних кластеров. Здесь возникает вопрос как определить соседние кластеры, с которыми данный кластер будет напрямую связываться, так как определение таких кластеров как кластеры, имеющие ближайшие 2 узла, может привести к плохому решению, рис. 1 демонстрирует такую ситуацию. Алгоритм соединения на основе двух ближайших городов разных кластеров сначала соединяет города g_3 из кластера 1 и g_9 из кластера 3, так как они самые близкие к друг другу, затем соединяет g_2 и g_4 , g_8 и g_{11} , после чего остается соединить кластеры 2 и 4 между собой чтобы получить цикл Гамильтона, а ближайшие друг к другу города в этих кластерах являются g_5 и g_{10} , в итоге маршрут пересекается с самим собой.

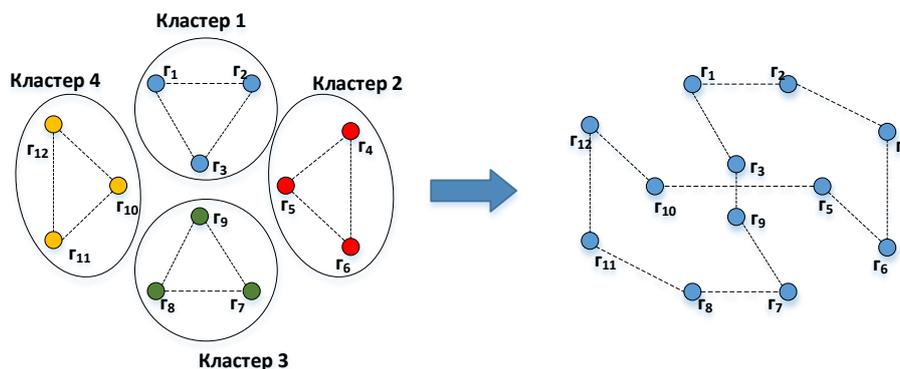


Рис. 1. Пример пересечения маршрута с самим собой

Для решения этой проблемы предлагается сначала найти оптимальный межкластерный цикл Гамильтона (цикл Гамильтона, обходящий центра кластеров) и соединять кластеры только с соседними кластерами по этому циклу. Таким образом, соединяем ближайшие города кластеров 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1, избежав соединения кластеров 1 и 3, как показано на рис. 2.

3. Как следует учитывать будущие межкластерные соединения при построении маршрутов внутри кластеров?

Так как маршруты внутри кластеров в дальнейшем будут частью единого супермаршрута, необходимо учитывать возможность их «стыковки» между кластерами уже на этапе маршрутизации. Это требует специального подхода при решении задачи КВ в каждом кластере.

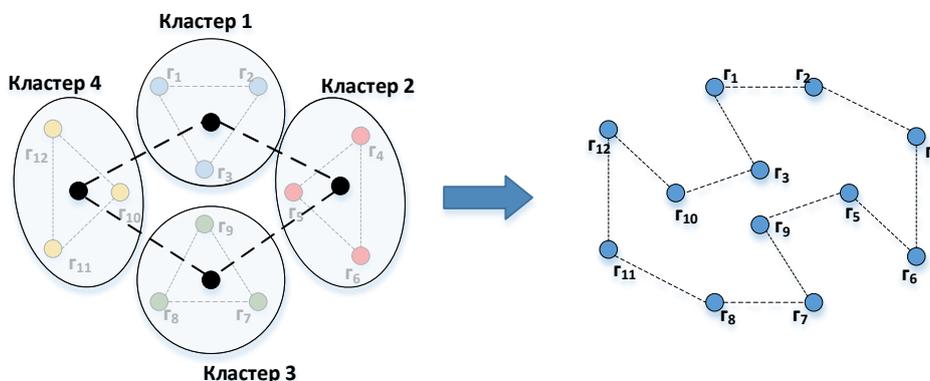


Рис. 2. Пример предложенного решения проблемы пересечения маршрута с самим собой

Например, в подходе CFRS чтобы решить проблему много-агентного коммивояжера стоит лишь искусственно добавить города депо в каждом кластере, затем найти оптимальный цикл Гамильтона в каждом кластере, однако, в предлагаемом методе такое решение не подходит в связи с тем, что эти под-маршруты нужно заново соединить друг с другом через узлы соединения, что приводит к существенному (далеко от оптимальному) изменению порядка посещения городов внутри каждого кластера. Рис. 3 демонстрирует ситуацию, где после расчета оптимального цикла Гамильтона в каждом кластере происходит соединение соседних кластеров по принципу ближайших узлов (кластеры 1 и 2 через узлы Г5 и Г7, кластеры 2 и 3 через узлы Г10 и Г13, кластеры 3 и 4 через узлы Г16 и Г17, кластеры 4 и 1 через узлы Г24 и Г4). Замечаем, что узлы Г6, Г11, Г12 и Г20 выпадают из цикла, что требует проведения дополнительных расчетов для включения их в цикл.

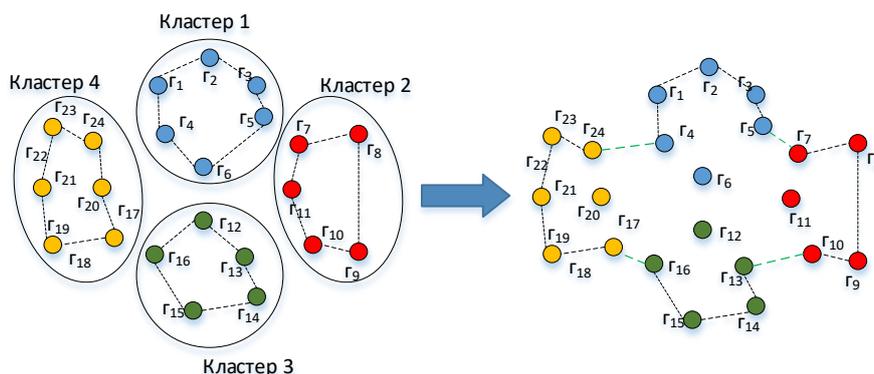


Рис. 3. Пример возникновения проблемы при соединении маршрутов

Для решения этой проблемы предлагается введение этапа определения узлов соединения перед этапом меж-кластерной маршрутизации и вместо оптимального цикла Гамильтона в каждом кластере найти оптимальный путь Гамильтона (незамкнутый путь, проходящий через все вершины графа) где начальный узел – узел соединения с предыдущим кластером, а конечный узел – узел соединения со следующим кластером. Тогда на этапе соединения кластеров проблема разрыва пути не возникает.

Таким образом, алгоритм предлагаемого метода будет выглядеть так:

Алгоритм 1 предлагаемый метод.

- 1 Инициализация гиперпараметров муравьиного алгоритма и количества кластеров
- 2 Кластеризация с помощью алгоритма K-Means
- 3 Поиск оптимального меж-кластерного цикла Гамильтона
- 4 Определение узлов соединения кластеров
- 5 Поиск оптимального Гамильтонова пути в каждом кластере
- 6 Соединение Гамильтоновых путей в супер-маршрут с помощью узлов соединения
- 7 Разделение супер-маршрута между агентами на под-маршруты

Моделирование и Результаты. Для оценки эффективности предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с существующими методами из подходов Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second использованы три задачи из библиотеки эталонных задач коммивояжёра TSPLIB [17]: eil51, kroA100 и kroA150, содержащие соответственно 51, 100 и 150 городов. Для каждой задачи рассматривались три сценария с различным количеством коммивояжёров: 3, 5 и 10 агентов. Чтобы обеспечить достоверность результатов, каждый сценарий запускался по 100 раз, и результаты усреднялись для получения представительной выборки. Для сравнения были реализованы два эталонных метода:

1. Из подхода Cluster-First, Route-Second: в качестве реализации этого подхода была выбрана работа Латаха [18], в которой предложен алгоритм KM-CACO. На первом этапе используется алгоритм K-Means для кластеризации городов, где число кластеров соответствует числу агентов. Далее внутри каждого кластера строится оптимальный маршрут с помощью модифицированного муравьиного алгоритма (ACO).

2. Из подхода Route-First, Cluster-Second: в качестве реализации этого подхода использован метод из работы [19], где предлагается построить единый маршрут на все города с использованием муравьиного алгоритма, а затем разбить его между агентами так, чтобы минимизировать дисбаланс нагрузки между ними (в терминах длины маршрута).

Критерии оценки производительности указанных методов:

- ♦ времени расчета решения многоагентной задачи коммивояжера.
- ♦ суммы пройденных коммивояжерами путей, согласно следующей формуле:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\sum_{i=1}^m C(Tour_i)), \quad (1)$$

при условии: $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

где i, j – номер коммивояжера, $Tour_i$ – маршрут i -го коммивояжера, m – количество коммивояжеров задачи, $TOURS$ – совокупность всех возможных туров. $C(.)$ – функционал качества (длина маршрута).

- ♦ максимального по длине пути среди путей, пройденных коммивояжерами, для сравнения сбалансированности и равномерности распределения городов между коммивояжерами, согласно формуле:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\max_{j \in 1 \dots m} C(Tour_j)), \quad (2)$$

при условии: $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$.

Коэффициент испарения феромона муравьиного алгоритма во всех сценариях составил 0.5; количество муравьев K составило n , Критерием завершения работы муравьиного алгоритма было повторение 20 итераций без повышения качества найденного решения. Такой выбор гиперпараметров муравьиного алгоритма предложен в [20] как оптимальный для решения задачи коммивояжера.

Алгоритмы запрограммированы на языке Python 3.8. Для моделирования использовался процессор Intel Core i7-9700KF CPU @ 3.60GHz RAM= 32GB, ОС Windows 10 Pro 64-bit.

Табл. 1, 2 и 3 содержат результаты решения соответствующих задач eil51, kroA100 и kroA150, с количествами коммивояжеров 3, 5 и 10, соответственно; здесь приведены проценты ситуаций (% Выигрыша), в которых предлагаемый метод показал результат лучший, чем методов реализующих подходов CFRS и RFCS с точки зрения суммы пройденных путей и критерия минимальности максимальной длины пути; Также выражены преимущества в процентах при использовании предлагаемого метода в отношении времени расчета, суммарной и максимальной длин пути. При этом отрицательный процент означает, что предлагаемый метод в таких ситуациях не уменьшает показатель качества решения (времени расчета, суммарной и максимальной длин пути), а увеличивает его по сравнению с остальными методами.

Преимущество предлагаемого метода m_p в отношении рассмотренных здесь других методов m_2 в процентах по каждому из **трех** критериев оценки Ψ_x (по среднему времени вычисления среди 100 запусков по времени расчета решения в секундах (μ_t), по сумме длин путей в метрах (μ_{sum}) и по максимальной длине пути среди коммивояжеров в метрах (μ_{max})), можно рассчитать следующим образом:

$$\Delta_{\Psi_x} = \left(1 - \frac{\Psi_x^{(m_p)}}{\Psi_x^{(m_2)}} \right) \cdot 100. \quad (3)$$

Таблица 1

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи eil51

Подход	CFRS			RFCS			
	m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша		64	93.75	96.7	8.9	91	95.4
Avg Δ_{μ_t}		63.25	67.86	-233.26	95.18	93.93	45.86
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$		-5.85	-5.32	-7.5	-6.09	0.75	0.02
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$		3.03	4.63	5.73	-5.95	0	-0.74

Таблица 2

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи KroA100

Подход	CFRS			RFCS			
	m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша		100	97.8	97.75	68	94.6	97.75
Avg Δ_{μ_t}		47.48	60.33	-168.42	95.67	94.77	59.9
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$		-2.05	-5.59	-9.97	-4.29	0.23	-1.15
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$		12.07	8.20	4.29	-4.13	1.28	-0.06

Таблица 3

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи KroA150

Подход	CFRS			RFCS			
	m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша		99.6	98.6	98.3	79.6	92	97.7
Avg Δ_{μ_t}		34.12	52.54	-132.95	95.95	95.30	68.09
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$		0.47	-4.56	-9.20	-3.41	0.17	-0.54
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$		16.53	9.21	5.25	-3.6	0.96	0.2

На рис. 4 показаны скрипичные диаграммы выигрыша в процентах по времени расчета, суммы длин путей и максимальной длины путей при использовании предлагаемого метода для каждой эталонной задачи.

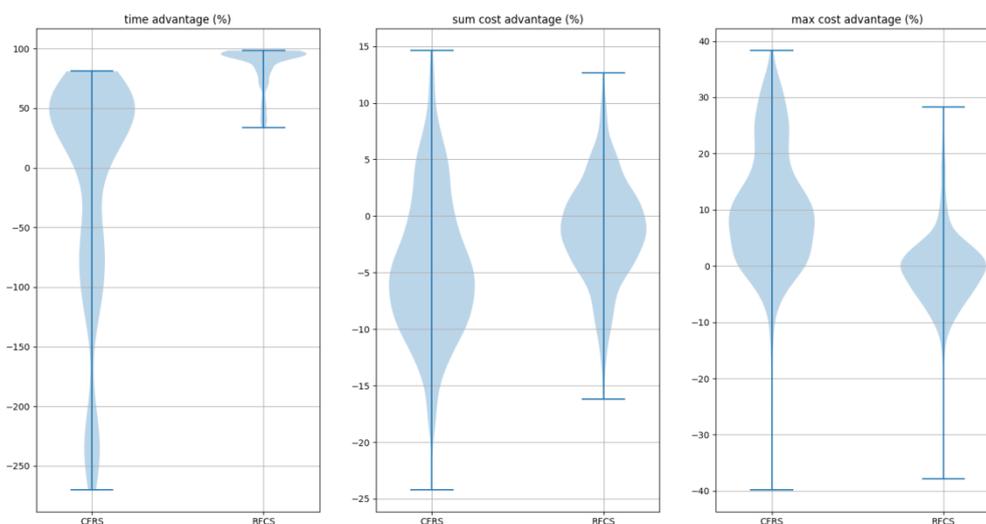


Рис. 4. Скрипичные диаграммы выигрыша при использовании предлагаемого метода

На основании представленных в этих таблицах данных можно сделать вывод, что предлагаемый метод имеет преимущество по времени расчета для 3 и 5 агентов, и по критерию MinMax – для 5 и 10 агентов.

Анализ полученных результатов расчета, представленных в указанных таблицах, показывает, что предложенный метод по сравнению с RFCS уменьшает время расчета на 88–2860%, а максимальная длина пути среди коммивояжеров уменьшается в среднем на 0.1–10 % для задач с 5 и 10 агентами и увеличивает в среднем на 2–5 % для задач с 3 агентами.

Предложенный метод по сравнению с CFRS уменьшает время расчета на 12–68% для задач с 3 и 5 агентами и увеличивает в среднем на 60–233 % для задач с 10 агентами, а максимальная длина пути среди коммивояжеров уменьшается в среднем на 1–26 %.

Заключение. Предлагается гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжера на основе уменьшения пространства решений. Проведено исследование предложенной методики на трех эталонных задачах коммивояжера с участием 3, 5, 10 агентов. Качество решения измерялось по 3 критериям: времени расчета решения, сумме постоянных маршрутов всех коммивояжеров, максимальной длине пути среди пройденных всеми агентами маршрутов. Результаты сравнивались с традиционными методами решения МКВ на основе муравьиного алгоритма. Статистический анализ результатов показал, что в среднем, предложенный метод предлагает хороший компромисс между временем расчета и качеством решения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов», <https://rscf.ru/project/24-29-00492/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems // J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl. – 2017. – 88 (2-4). – P. 513-526. – <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-016-0458-5>.
2. Vali M., Salimifard K. A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem // The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation. – 2017.
3. Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L. A new crossover approach for solving the multiple traveling salesman problem using genetic algorithms // European J. Oper. Res. – 2013. – P. 72-82.
4. Al-Omeer M.A., Ahmed Z.H. Comparative study of crossover operators for the mtsp // 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS). – IEEE, 2019. – P. 1-6.
5. Xu Z., Li Y., Feng X. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system // 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. – 2008. – Vol. 1. – P. 462-466. – <http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318>.
6. Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M. A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – May 2017. – Vol. 17, No. 5.
7. Basma H., Bashir H., Cheaitou A. A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem // Journal of Industrial Engineering and Management JIEM. – 2021. – Vol. 14, No. 2.
8. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of careful seeding // Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. – 2007.
9. Sofge D., Schultz A., & De Jong K. Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema // Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops. – 2002. – P. 153-162.
10. Beasley J.E. Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing // Omega. – 1983. – Vol. 11, Issue 4. – P. 403-408.
11. Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö. Route First - Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem // Journal of Engineering Studies and Research. – 2019. – Vol. 25. No. 2. – P. 18-24.
12. Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space // 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024. – P. 1729-1733. – DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem // Comput. Oper. Res. – 2004. – 31. – P. 1985-2002.
14. Morissette, Laurence & Chartier, Sylvain. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // Tutorials in Quantitative Methods for Psychology. – 2013. – 9. – P. 15-24. – 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization // IEEE Comput. Intell. Mag. – 2006. – P. 28-39.
16. Хуссейн Ф.А. Разработка и исследование метода централизованного распределения задач в мультиагентных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – №. 4.
17. Ruprecht-Karls. TSPLIB. Available online: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95> (accessed on 4 August 2024).
18. Latah M. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2016. – Vol. 5, No. 02.

19. Костюков В.А., Хуссейн Ф.А., Евдокимов И.Д. Метод решения проблемы мульти-коммивояжера в среде без препятствий на основе уменьшения размера пространства решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. No. 1.
20. Dorigo M., Maniezzo V., & Colomi A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B. – 1996. – 26 (1). – P. 29-41.

REFERENCES

1. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems, *J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl.*, 2017, 88 (2–4), pp. 513-526. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-016-0458-5>.
2. Vali M., Salimifard K. A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem, *The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation*, 2017.
3. Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L. A new crossover approach for solving the multiple traveling salesman problem using genetic algorithms, *European J. Oper. Res.*, 2013, pp. 72-82.
4. Al-Omeir M.A., Ahmed Z.H. Comparative study of crossover operators for the mtsp, *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)*. IEEE, 2019, pp. 1-6.
5. Xu Z., Li Y., Feng X. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system, *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, 2008, Vol. 1, pp. 462-466. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318>.
6. Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M. A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, May 2017, Vol. 17, No. 5.
7. Basma H., Bashir H., Cheaitou A. A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem, *Journal of Industrial Engineering and Management JIEM*, 2021, Vol. 14, No. 2.
8. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of careful seeding, *Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, 2007.
9. Sofge D., Schultz A., & De Jong K. Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema, *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops*, 2002, pp. 153-162.
10. Beasley J.E. Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing, *Omega*, 1983, Vol. 11, Issue 4, pp. 403-408.
11. Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö. Route First - Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem, *Journal of Engineering Studies and Research*, 2019, Vol. 25. No. 2, pp. 18-24.
12. Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space, *2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, Vallette, Malta, 2024, pp. 1729-1733. DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem // *Comput. Oper. Res.* – 2004. – 31. – P. 1985-2002.
14. Morissette, Laurence & Chartier, Sylvain. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica, *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2013, 9, pp. 15-24. 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization, *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 2006, pp. 28-39.
16. Khusseyin F.A. Razrabotka i issledovanie metoda tsentralizovannogo raspredeleniya zadach v mul'tiagentnykh sistemakh [Development and research of the method of centralized distribution of tasks in multi-agent systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4.
17. Ruprecht-Karls. TSPLIB. Available online: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95> (accessed on 4 August 2024).
18. Latah M. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2016, Vol. 5, No. 02.
19. Kostyukov V.A., Khusseyin F.A., Evdokimov I.D. Metod resheniya problemy mul'tikommivoyazhera v srede bez prepyatstviy na osnove umen'sheniya razmera prostranstva resheniy [Method for solving the multi-traveling salesman problem in an obstacle-free environment based on reducing the size of the solution space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1.
20. Dorigo M., Maniezzo V., & Colomi A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*, 1996, 26 (1), pp. 29-41.

Костюков Владимир Александрович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; научный руководитель.

Хуссейн Фирас Айманович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; can. of eng. sc.; senior researcher.

Houssein Firas Aimanovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: firas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79996379357; junior researcher.

УДК 004.738.5:004.023:303.222

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-155-162

А.Ю. Таранов

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕМПОРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕРНЕТ-ДИСКУССИЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Целью исследования является разработка и проверка методов оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий, основанных на анализе количества и продолжительности взаимодействий пользователей в интернете (в социальных сетях, на форумах и т.п.). Описываются разработанные в рамках данной работы новые методы оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий, основанные на анализе количества и продолжительности взаимодействий пользователей в интернете. Особое внимание уделяется методам определения интенсивности и длительности дискуссий, что позволяет получить более точную оценку динамики обсуждений в реальном времени. Оценка интенсивности дискуссии производится через соотношение количества взаимодействий (таких, например, как комментарии, реплай, лайки) и продолжительности онлайн-обсуждения. Предложен метод корректного определения длительности дискуссии, в котором производится учет не только время с момента публикации поста, но также и активность пользователей в процессе обсуждения, что делает данный метод более гибким и точным. Для проверки разработанных методов использовались реальные данные из сообществ ВКонтакте городов Таганрога и Сарова. Результаты практических исследований подтвердили существование ожидаемых закономерностей, таких, например, как суточные колебания в уровнях активности пользователей и всплески активности, связанные с различными важными общественными и политическими событиями. Разработанные методы оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий на основе количества и продолжительности взаимодействий пользователей позволяют эффективно анализировать динамику вовлеченности участников дискуссий, выявлять ключевые моменты, а также значимые события в процессе онлайн-общения. Данные методы могут быть полезными в различных областях, таких как социальные исследования, маркетинг, политический анализ, управление репутационными рисками и другие, где требуется анализ активности и вовлеченности в интернете.

Социальные сети; анализ активности; интенсивность дискуссии; длительность дискуссии; временные ряды.

A.Yu. Taranov

METHODS FOR ASSESSING THE TEMPORAL STRUCTURE OF INTERNET DISCUSSIONS BASED ON THE NUMBER AND DURATION OF USER INTERACTIONS

The aim of the research is to develop and test methods for assessing the temporal structure of online discussions based on the analysis of the number and duration of user interactions on the internet (in social networks, forums, etc.). The article describes new methods for assessing the temporal structure of online discussions, developed within the scope of this work, based on the analysis of the number and duration of user interactions on the internet. Particular attention is given to methods for determining both the intensity and duration of discussions, which enables a more accurate assessment of the real-time dynamics of discussions. The intensity of a discussion is assessed through the ratio of the number of interactions (such