

На правах рукописи



Хуссейн Фирас Айманович

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ ЗАДАЧИ
КОММИВОВАЖЕРА НА ОСНОВЕ СОКРАЩЕНИЯ ПОИСКОВОГО
ПРОСТРАНСТВА

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре электротехники и мехатроники Института радиотехнических систем и управления.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Медведев Михаил Юрьевич,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
профессор кафедры электротехники и мехатроники,
г. Таганрог

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент,
Тебуева Фариза Биляловна,
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова, г. Ставрополь

доктор технических наук, доцент
Лебедев Олег Борисович,
ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», профессор, и.о. заведующего кафедрой «Информатика» Института кибербезопасности и цифровых технологий, г. Москва

Защита диссертации состоится «22» мая 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.09 в Южном федеральном университете по адресу: г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус «К», ауд. К-205.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на официальном сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1348266/>

Отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации и оформленный согласно Положению о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», с указанием ФИО (полностью) лица, представившего отзыв, почтовым адресом, наименованием организации, его должности в этой организации, телефона и адреса электронной почты, просим направлять по адресу 347922, Россия, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, НИИ РиПУ, К-206Б, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.09 Косенко Е.Ю.

Автореферат разослан «12» марта 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ЮФУ801.02.09,
кандидат технических наук, доцент



Е.Ю. Косенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многоагентные системы представляют собой коллективы автономных агентов, способных координировать свои действия для решения общей задачи. В настоящее время эти системы находят широкое применение в разных областях, таких как промышленность, логистика, медицина и оборона.

В связи с расширением сферы применения многоагентных систем, всё большую значимость приобретают методы группового управления подвижными агентами – элементами этих систем, среди которых важнейшими являются задачи целераспределения, маршрутизации и балансировки нагрузки.

Решения подобных задач особенно критичны при наличии ограничений по времени, энергии и другим ресурсам. Одним из ключевых направлений здесь является оптимизация маршрутов агентов при выполнении пространственно-распределённых задач, что на практике сводится к задаче, известной как многоагентная задача коммивояжёра (МКВ).

Многоагентная задача коммивояжёра — это обобщение классической задачи коммивояжёра, в которой допускается присутствие более одного коммивояжёра (агента). Её целью является определить маршрут для каждого коммивояжёра таким образом, чтобы оптимизировать заданный функционал качества, а каждый город посетил ровно один коммивояжер. Таким образом, многие задачи целераспределения в мультиагентных системах сводятся к формулировке МКВ или её вариациям, что делает исследование соответствующих методов особенно актуальным.

Качество и эффективность решения МКВ во многом зависит от сложности задачи (количество агентов и городов, пространственное распределение, наличие ограничений) и от выбранного метода решения. Во-первых, метод должен оптимизировать заданную целевую функцию — например, минимизировать общее пройденное агентами расстояние, время миссии или неравномерность загрузки агентов, чтобы избежать ситуаций, когда некоторые агенты перегружены, а другие недогружены. Во-вторых, метод должен обладать приемлемой вычислительной сложностью, что особенно влияет на степень его

масштабируемости — его способности эффективно работать при увеличении числа задач и агентов.

Таким образом, разработка эффективных методов решения многоагентной задачи коммивояжёра является актуальной задачей для целого ряда приложений мультиагентных систем.

Степень разработанности темы. Многоагентная задача коммивояжёра получила широкое распространение при формализации проблем маршрутизации мобильных роботов, распределения задач между роботами, планирования логистических операций и др. Основными критериями оптимальности в таких задачах, как правило, выступают минимизация суммарной длины маршрутов или минимизация длины самого длинного маршрута.

В научной литературе представлено большое количество методов и алгоритмов решения МКВ. Среди них — точные (например, метод ветвей и границ, методы динамического программирования), эвристические (жадные алгоритмы, методы кластеризации) и метаэвристические (генетические алгоритмы, рой частиц, муравьиные алгоритмы и др.). Особый интерес вызывают гибридные методы, сочетающие элементы кластеризации, построения маршрутов и локального поиска.

Однако, несмотря на значительное количество работ, проблема эффективного решения МКВ в условиях статически заданной среды остаётся актуальной. Это связано с высокой вычислительной сложностью задачи, чувствительностью решений к параметрам задачи и гиперпараметрам алгоритмов решения, а также с недостаточной исследованностью стратегий, комбинирующих этапы маршрутизации, кластеризации и локальной оптимизации.

Различным аспектам проблемы целераспределения и МКВ посвящены работы отечественных (Германчук М.С., Бурховецкий В.В., Полупанова Е.Е., Рыбалко А.А., Козлова М.Г., Лукьяненко В.А., Макаров О.О., Матвиевская Т.Б., Тарков М.С., Дугаров Г.А. и др.) и зарубежных (Howard T.M., Khatib O., Khoufi I., Hadded M., Dorigo M., Kolmanovsky I., Latah M., Cheikhrouhou O., Koubaa A., Bennaceur H., и др.) ученых.

Объектом исследования является многоагентная система, представленная группой подвижных объектов.

Предметом исследования являются методы решения многоагентной задачи коммивояжёра.

Целью диссертационной работы является разработка методов решения многоагентной задачи коммивояжёра, обеспечивающих повышение показателей качества решения и сокращение времени расчета.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Провести анализ методов и алгоритмов решения многоагентной задачи коммивояжёра.
2. Определить целевые критерии, характерные для практических задач группового управления.
3. Разработать методы решения МКВ, сочетающие элементы кластеризации и маршрутизации, обеспечивающие компромисс между качеством решений и вычислительными затратами.
4. Провести экспериментальные исследования разработанных методов на тестовых задачах, оценить влияние числа агентов и заданий на качество решений, а также сравнить с существующими подходами по основным метрикам качества.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы оптимизации, математического и численного моделирования и прикладного программирования. Основные расчеты, моделирование и разработка программ выполнены с использованием программных продуктов: PyCharm, Anaconda Notebook. Язык программирования – Python.

Научная новизна заключается в разработке гибридного метода решения МКВ, отличающегося сочетанием подходов «сначала маршрутизация, затем кластеризация» и «сначала кластеризация, затем маршрутизация», что позволяет:

- повысить равномерность распределения нагрузки между агентами системы;
- сократить время вычислений за счет уменьшения размера поискового пространства;
- обеспечить гибкий компромисс между качеством решения и временем вычислений за счёт регулирования количества.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость полученных результатов заключается в развитии методов решения МКВ, направленных на повышение эффективности в условиях статических сред. Алгоритмы, соответствующие предлагаемым методам, реализованы на языке

Python в виде комплекса программ, обеспечивающего распределения задач и маршрутизации в группе подвижных объектов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки систем группового управления автономными подвижными объектами и способствуют повышению их эффективности за счёт сокращения времени достижения цели.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- строгими математическими обоснованиями, основанными на принципах и методах системного анализа;
- соответствием теоретических выводов результатам компьютерного моделирования, проведённого в специализированных программно-аппаратных средах;
- согласованием результатов работы с опубликованными результатами научных исследований и экспериментов других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы.

Теоретические и практические результаты, полученные в рамках работы, использованы при выполнении гранта РФФИ № 24-29-00492 «Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов», проведённого на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления». Результаты, полученные в ходе исследования, использовались при выполнении работ по гранту УМНИК Фонда содействия инновациям. Результаты работы внедрены при разработке и исследовании сценариев применения групп робототехнических платформ при решении типовых задач в рамках проекта «Экспериментально-теоретические исследования по отработке технологии автономного управления движением группы наземных робототехнических платформ», головной исполнитель АО «НПО Андронидная техника» (г. Магнитогорск).

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором и обладающие научной новизной:

1. Метод решения многоагентной задачи коммивояжёра, основанный на подходе «сначала маршрутизация, затем кластеризация», отличающийся использованием алгоритма локального поиска для повышения качества решения.
2. Гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжёра, отличающийся сочетанием подходов «сначала

маршрутизация, затем кластеризация» и «сначала кластеризация, затем маршрутизация», что позволяет сократить время вычислений и улучшить равномерность распределения нагрузки между агентами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Критерий максимального по длине пути среди агентов является более важным по сравнению с критерием суммарной длины маршрутов в многоагентной задаче коммивояжёра.

2. Применение алгоритма локального поиска (2-opt) в сочетании с подходом «сначала маршрутизация, затем кластеризация» повышает эффективность решения многоагентной задачи коммивояжёра по критерию минимизации общей (суммарной) длины маршрутов.

3. Гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжёра, основанный на объединении подходов «сначала маршрутизация, затем кластеризация» и «сначала кластеризация, затем маршрутизация» позволяет достичь компромисса между временем расчета решения и качеством получаемого решения.

4. Предлагаемый гибридный метод позволяет управлять компромиссом между временем вычислений и качеством решения за счёт изменения количества кластеров на первом этапе.

Апробация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты работы докладывались на XIX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» 2024 (п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2024» (г. Таганрог), Международной конференции 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies CoDIT 2024 (Валлетта, Мальта), XX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» 2025 (п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2025» (г. Казань), Международной конференции 11th International Conference

on Control, Decision and Information Technologies CoDIT 2025 (Сплит, Хорватия).

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертационной работы получены автором лично.

Публикации. Основные результаты исследований по теме работы изложены в 9 работах, в том числе: в 4 статьях в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук; в 2 статьях в иностранных научных изданиях, включенных в систему цитирования Scopus; в 2 докладах на всероссийских и международных конференциях; а также получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 77 наименований, содержания и двух приложений. Основная часть работы изложена на 147 страницах и включает в себя 58 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, выделены основные положения и научные результаты работы, имеющие научную новизну и практическую значимость.

В первой главе содержится обзор литературы, кратко рассмотрены подходы к решению многоагентной задачи коммивояжёра. Были рассмотрены три основных подхода к решению МКВ с точки зрения решения её составляющих подзадач: подход одновременной оптимизации, подход «Сначала кластеризация, затем маршрутизация» (СКЗМ) (Cluster-first, route-second (CFRS)) и подход «Сначала маршрутизация, затем кластеризация» (СМЗК) (Route-first, cluster-second (RFCS)).

Определены основные критерии оценки качества решения:

- **MinSum** – минимизация суммарных затрат (например, расстояние или время) всех агентов:

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

при условии: $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \geq 1, j \leq m$, где i, j – номер коммивояжера, $Tour_i$ – маршрут коммивояжера i , m – количество коммивояжеров, $TOURS$ – множество возможных решений данной МКВ, $C(.)$ – функция стоимости (длина маршрута).

- MinMax – минимизация стоимости самого затратного маршрута (например, с точки зрения расстояния или времени) среди всех агентов:

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

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

- Время вычисления — минимизация времени, затрачиваемого на получение решения.

Доказана следующая лемма: суммарная длина маршрутов всех агентов при решении многоагентной задачи коммивояжера для заданного набора городов всегда превышает длину кратчайшего маршрута решения задачи одиночного коммивояжера (КВ) для того же набора, при условии, что все коммивояжеры начинают и заканчивают маршрут в одном и том же городе (депо). Доказательство леммы приведено в диссертации.

Отмечено, что методы, реализующие подход одновременной оптимизации, способны найти оптимальное решение, но с большими временными затратами. Объем пространства решений МКВ с n задачами и m агентами можно рассчитать с помощью числа Лаха по следующей формуле:

$$L(n, m) = \left(\frac{n!}{m!} \right)^2 \cdot \frac{m}{n(n-m)!}. \quad (3)$$

Установлено, что методы, реализующие подход СКЗМ существенно сокращают время расчета решения за счёт разбиения задачи на несколько более простых задач, однако, данный подход не имеет конкретного механизма оптимизации решения по критерию MinMax. Размер пространства решений МКВ с n городами и m

агентами для данного подхода можно оценить с помощью следующей формулы:

$$R(n, m) = S(n, m) + \sum_{i=1}^m B_i!, \quad (4)$$

$$\text{где: } S(n, m) = \frac{1}{m!} \sum_{i=0}^m \left((-1)^i \frac{m!}{i!(m-i)!} (m-i)^n \right),$$

$$\sum_{i=1}^m B_i! \in \left[m \left(\frac{n-1}{m} \right)!, (n-m)! \right].$$

Выявлено, что методы, реализующие подход СМЗК обладают более гибким механизмом оптимизации решения по критерию MinMax, но за счет больших временных затрат, так как задача МКВ сводится к задаче КВ, следовательно, размер пространства решений составит $(n-1)!$

Указанные проблемы и возможные направления их решения научно обосновывают актуальность и важность поставленных в работе целей и задач.

Вторая глава посвящена модификации известного метода решения задачи МКВ, основанного на подходе СМЗК, для повышения его производительности.

Ключевые этапы модифицированного метода включают следующие:

1- построение маршрута: решение задачи коммивояжера или аналогичной задачи маршрутизации, для создания единого маршрута (супермаршрут), охватывающего все узлы задачи. Результатом является гамильтонов цикл, соединяющий все узлы в эффективном порядке. Процесс построение маршрута обычно направлен на минимизацию длины гамильтонова цикла. Для реализации данного этапа в диссертации использовался муравьиный алгоритм (МА) (Ant Colony Optimization, ACO), где действует вероятностно-пропорциональное правило, задающее вероятность перехода k -го муравья из узла i к узлу j (На рисунке 1 изображена примерная среда передвижения, каждая точка это узел.), она зависит от уровня феромона между узлами i и j (τ_{ij}) и от заданной эвристики (η_{ij}), которая в основном выбирается как обратная величина расстояния

между узлами i и j . Влияние τ_{ij} и η_{ij} на вероятности прохода регулируется двумя параметрами α и β последовательно. Таким образом, и с учётом того, что $J_{i,k}$ – это список еще не посещенных узлов муравьем k , $P_{ij,k}$ – вероятность перехода из узла i в узел j рассчитывается следующей формулой:

$$P_{ij,k} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{j \in J_{i,k}} \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta} . \quad (5)$$

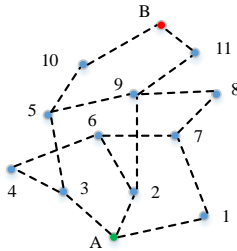


Рисунок 1. Пример среды работы муравьиного алгоритма, узлы и пути между ними

Формула (5) определяет вероятности выбора конкретного узла. Сам выбор сделан по принципу колеса рулетки: в каждом узле есть свой сектор, площадь которого пропорциональна с вероятностью $P_{ij,k}$. Когда муравей k достигает цели, то он оставляет феромон $\Delta\tau$ между всеми узлами его маршрута T_k величиной, равной разделению константа интенсивности феромона Q на длину траектории L_k как показано в следующей формуле:

$$\Delta\tau_{ij,k} = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{если } (i,j) \in T_k \\ 0 & \text{если } (i,j) \notin T_k \end{cases} . \quad (6)$$

Чтобы изучить все пространство решений и избежать попадания в локальный минимум, феромон, поставленный всеми муравьями K , должен испаряться в каждом цикле алгоритма t относительно заданного коэффициента испарения ρ согласно выражению:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)t + \sum_{k=1}^K \Delta\tau_{ij,k} . \quad (7)$$

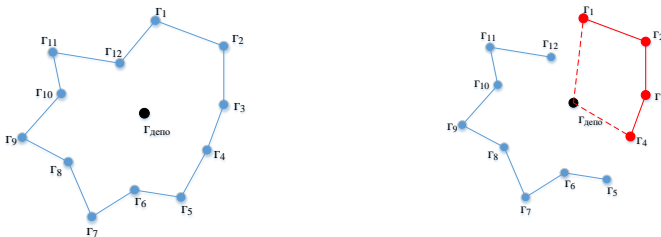
2- разбиение маршрута: разделение супермаршрута на несколько подмаршрутов или кластеров. Каждый кластер соответствует определенному агенту. Процесс разделения обычно направлен на балансировку нагрузки между агентами или минимизацию таких критериев, как максимальная длина отдельного маршрута (мин-макс). Этот этап реализуется следующим алгоритмом:

- создается матрица расстояний D^* между каждым городом и остальными городами, следуя гамильтонову циклу. Затем рассчитывается оценка длины маршрута d^* , который должен пройти каждый агент, как отношение общей длины супермаршрута к количеству агентов;

- затем проводится последовательный перебор городов для первого агента, начиная с первого города (Γ_1 шаг 1 рисунок 2), чтобы найти город, до которого расстояние по кусочно-ломаной траектории максимально близко к d^* (Γ_4 шаг 1 рисунок 2). Для поиска нужного города используется ранее созданная матрица расстояний между каждой парой городов;

- первым городом следующего агента выбирается город, следующий за последним городом текущего агента (Γ_5 шаг 2 рисунок 2), и процесс повторяется до тех пор, пока не будут распределены все агенты (шаг 3 рисунок 2). Затем вычисляется и сохраняется сумма длин маршрутов всех агентов;

- начальный город первого агента изменяется циклически до тех пор, пока не будут рассмотрены все возможные решения. В итоге сохраняется решение, обеспечивающее минимальную сумму пройденных расстояний.



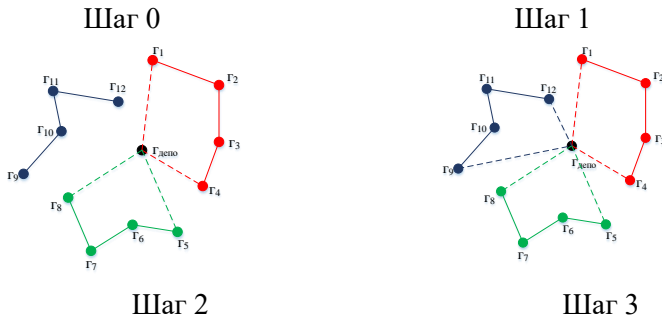


Рисунок 2. Пример работы одной итерации алгоритма разделения пути между тремя коммивояжёрами

3- улучшение результирующего решения с помощью алгоритма 2-орт: решения, генерируемые с помощью МА, не всегда могут быть оптимизированы. Это может быть связано с вероятностными правилами, на которых основан МА. Кроме того, после разделения супермаршрута и соединения каждого подмаршрута с городом-депо возможна ситуация пересечения маршрута с самим собой из-за геометрического расположения городов и положения города депо.

Как показано на рисунке 3, точки и пунктирные линии определяют города и маршруты агентов, а круги выделяют места, где маршрут агента пересекается с самим собой, что указывает на неоптимальность маршрута.

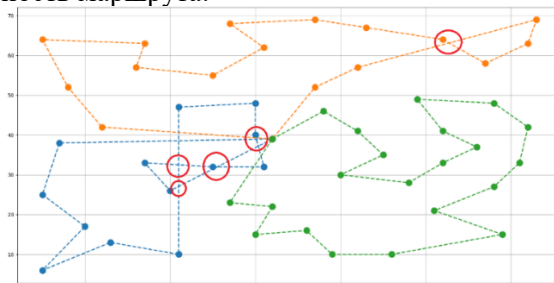


Рисунок 3. Пример где маршрут агента пересекается с самим собой

Алгоритм 2-орт по сути работает с начального допустимого решения и итеративно улучшает его, выявляя два пересекающихся ребра на маршруте, удаляя эти ребра и заново соединяя узлы для формирования нового маршрута. Как показано на рисунке 4.

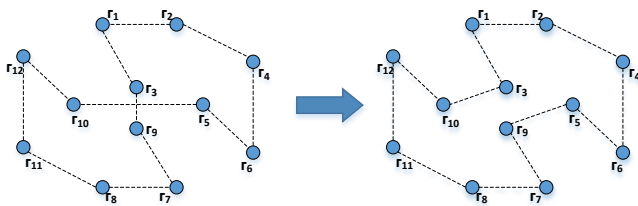


Рисунок 4. Пример работы алгоритма 2-орт

Для проведения сравнительного анализа из каждого подхода выбрано по одному методу. Одной из работ, относящихся к подходу одновременной оптимизации является работа, посвященная реализации муравьиного алгоритма с существенными модификациями его применения (ACO-BMTSP).

Представителем подхода СКЗМ является работа Латаха (KM-CACO), в которой он группирует города в кластеры, число которых равно числу коммивояжеров, используя алгоритма K-Means, а затем использует муравьиный алгоритм для поиска оптимального маршрута для каждого кластера.

Для исследования вышеуказанных методов были взяты за основу 3 задачи из соответствующей библиотеки эталонных задач коммивояжера TSPLIB (eil51, kroA100, и kroA150) с 51, 100 и 150 городами, соответственно. Для каждой из этих задач были поставлены 3 сценария с 3, 5 и 10 агентами. Каждый сценарий был решён 100 раз каждым из указанных методов для получения соответствующей представительной выборки.

Анализ полученных результатов расчета показывает, что предложенный метод превосходит ACO-BMTSP по всем критериям оценки, в частности, время расчета при использовании предлагаемого метода против ACO-BMTSP уменьшается в среднем на 9 – 54.5 %, при этом суммарная длина пути коммивояжеров уменьшается в среднем на 8.9 – 19.2 %, а максимальная длина пути среди коммивояжеров уменьшается в среднем на 12.4 – 20.2 %.

В сравнении с методом KM-CACO предлагаемый метод дает другие результаты. Предлагаемый метод превосходит KM-CACO с точки зрения минимизации максимальной длины пути среди агентов. При этом время расчёта увеличивается в среднем на 561-867% для задачи eil51, на 809-1777% для задачи kroA100 и на 1070-2589% для задачи kroA150, а суммарная длина пути коммивояжеров

увеличивается в среднем на 2–9% для сценариев с 5 и 10 коммивояжёрами, и уменьшается в среднем на 0.1–7% для сценариев с 3-я коммивояжёрами, а максимальная длина пути среди коммивояжёров уменьшается в среднем на 2 – 28.4 %

Третья глава посвящена разработке гибридного метода решения многоагентной задачи коммивояжёра «Кластеризация, маршрутизация, соединение, разделение» (КМСР), сочетающего элементов подходов: «Сначала кластеризация, затем маршрутизация» и «Сначала маршрутизация, затем кластеризация» для преодоления их недостатков.

Метод состоит из четырёх основных этапов, указанных ниже.

- **Кластеризация:** задачи (города) делятся на кластеры. Цель – распределить точки таким образом, чтобы минимизировать размера пространства решений.

- **Маршрутизация:** для каждого кластера строится оптимальный маршрут с использованием методов, таких как муравьиный алгоритм. Это обеспечивает предварительную оптимизацию маршрутов внутри каждого кластера.

- **Соединение:** все кластеры соединяются в единый маршрут (супермаршрут), включающий все города.

- **Разделение:** полученный супермаршрут делится на подмаршруты, каждый из которых связан с городом депо и закрепляется за конкретным коммивояжером. В процессе учитываются ограничения, такие как максимальная длина маршрута, балансировка нагрузки и времени выполнения.

Суть предлагаемого метода заключается в том, чтобы объединить преимущество подхода СКЗМ в разделении задачи на несколько подзадач, уменьшая в итоге размера пространства решений и, следовательно, время расчета, и преимущества подхода СМЗК в минимизации максимального по длине маршрута среди коммивояжёров.

Приведена эмпирическая оценка временной сложности предлагаемого метода в зависимости от размера задачи (количество городов задачи n и количество агентов m):

$$T(n) = O(n^2), \quad (8)$$

$$T(m) = O(m^2). \quad (9)$$

Для исследования предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с методами, реализующими подходы СКЗМ и СМЗК были взяты за основу 3 задачи eil51, kroA100, и kroA150. Для каждой из этих задач были поставлены 3 сценария с 3, 5 и 10 агентами. Каждый сценарии был запущен 100 раз для получения соответствующей представительной выборки.

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что предлагаемый метод по сравнению с методом, реализующего подход СМЗК сокращает время расчета на 33– 98%, а максимальная длина пути среди коммивояжёров 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.

Предлагаемый метод по сравнению с методом, реализующего подход СКЗМ, сокращает 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 коммивояжёров уменьшается в среднем на 10.33 %.

На рисунке 5 показаны скрипичные диаграммы преимущества в процентах по времени, преимущества в процентах по суммы длине пути и преимущества в процентах по максимальной длине пути соответственно слева направо при использовании предлагаемого метода в сравнении с методами, реализующими подходы СКЗМ и СМЗК. Отрицательное преимущество означает, что предлагаемый метод дает хуже результат по заданному критерию относительно соответствующего метода. Ширина диаграммы указывает на количество экспериментов с заданным результатом преимущества.

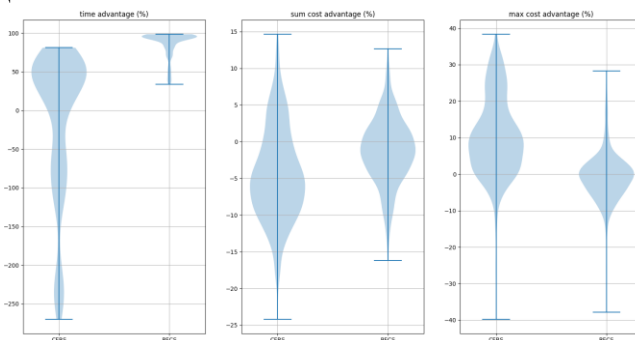


Рисунок 5. скрипачные диаграммы преимущества

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию разработанных методов. Разработанные методы распределения задач были интегрированы в симулятор РТП. По результатам вычислительных экспериментов можно сказать, что предложенный в третьей главе метод КМСП демонстрирует компромисс между качеством решения и временем вычислений. Хотя предложенный во второй главе метод, реализующий подход СМЗК немного превосходит его по показателям стоимости, КМСП работает значительно быстрее чем метод, реализующий подход СКЗМ. Эти результаты подтверждают, что КМСП является эффективной и практичной альтернативой для решения МКВ, особенно в сценариях, где вычислительная эффективность имеет решающее значение.

Для исследования предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с методами, реализующими подходы СКЗМ (метод КМ-САСО) и СМЗК (метод СМЗК-МА-2opt) были взяты за основу 100 задач с 51 случайно сгенерированным городом. Для каждой из этих задач были поставлены сценарии с 3 агентами.

В таблице 1 представлены усредненные по 100 экспериментам время расчета решения в секундах (μ_t), сумма длин путей в метрах (μ_{sum}) и максимальная длина пути среди коммивояжеров в метрах (μ_{max}).

Таблица 1 – средние значения результатов моделирования

Метод	μ_t	μ_{sum}	μ_{max}
КМ-САСО	0.631	1018.58	389.733
СМЗК-МА-2opt	5.747	957.909	342.517
КМСП	0.271	963.718	343.751

На рисунке 6 показаны скрипачные диаграммы преимущества в процентах по времени, преимущества в процентах по сумме длине пути и преимущества в процентах по максимальной длине пути соответственно слева направо при использовании предлагаемого метода против методов, реализующих подходы СКЗМ и СМЗК.

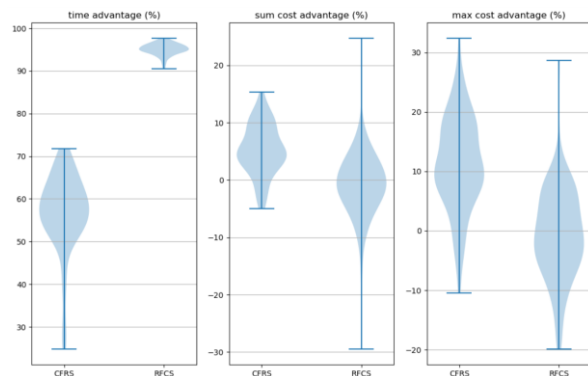


Рисунок 6. Сравнительное преимущество КМСП над КМ-САСО и СМЗК-МА-2орт

КМСП значительно превосходит КМ-САСО и СМЗК-МА-2орт по времени вычислений.

Преимущество над КМ-САСО особенно заметно, значения плотно сгруппированы около 95–98%, что указывает на то, что КМСП в среднем почти в 2 раза быстрее.

По сравнению с КМ-САСО экономия времени более изменчива и варьируется от примерно 25% до 70%, что отражает эффективность КМСП.

С точки зрения общей длины пути КМСП превосходит КМ-САСО почти во всех экспериментах, обычно показывая преимущество в диапазоне 5–10%.

По сравнению с СМЗК-МА-2орт, КМСП иногда достигает более коротких путей. Распределение центрировано немного ниже нуля, что указывает на то, что КМ-САСО в целом работает лучше по этой метрике, хотя и не во всех случаях.

КМСП последовательно снижает максимальную стоимость индивидуального маршрута по сравнению с КМ-САСО, с типичным преимуществом около 15–20%.

По сравнению с СМЗК-МА-2орт преимущество более сбалансировано, с более широким разбросом и медианой немного ниже нуля, что говорит о том, что СМЗК-МА-2орт может иногда превосходить КМСП, но КМСП по-прежнему конкурирует с ним вплотную.

Для оценки достоверности полученных результатов были проведены статистические проверки с использованием t-теста при

уровне значимости 10%. По всем ключевым критериям оценки качества решений (время вычислений, MinSum, MinMax) p-value оказалось выше выбранного порога, что не позволило отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии статистически значимых различий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является решение актуальной научной задачи, имеющей практическое значение: разработка, теоретическое обоснование и исследование методов и алгоритмов распределения задач и маршрутизации в мультиагентных системах. Критерии оценки включают показатели, суммарный пройденный группой путь, время расчета решения и максимальный по длине путь среди путей, пройденных коммивояжёрами, для сравнения сбалансированности и равномерности распределения городов между коммивояжёрами.

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Модифицированный метод решения многоагентной задачи коммивояжёра на основе подхода «сначала маршрутизация, затем кластеризация», что позволяет повысить качество решения.

2. Гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжёра на основе подходов «сначала маршрутизация, затем кластеризация» и «сначала кластеризация, затем маршрутизация», объединить их положительные стороны и избавиться от недостатков, следовательно, сократить время расчёта решения и дисбаланс нагрузки.

Полученные результаты были использованы в работах, реализованных в научно-исследовательском институте робототехники и процессов управления южного федерального университета. Результаты могут быть использованы для разработки систем группового управления автономными подвижными объектами и позволяют повысить эффективность их функционирования, уменьшить время расчета решения. В частности, разработанные методы могут быть использованы для решения задач мониторинга двумерных и трехмерных сред. Возможно также масштабирование результатов для сцен с большим количеством препятствий и увеличение числа подвижных объектов в группе.

Список наиболее важных работ, опубликованных по теме диссертации. Основное содержание исследования изложено в следующих публикациях.

Публикации в ведущих научных журналах из списка ВАК

1. Хуссейн, Ф. А. Разработка и исследование метода централизованного распределения задач в мультиагентных системах / Ф. А. Хуссейн // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4(240). – С. 40-49. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-40-49. (K2).

2. Хуссейн, Ф. А. Метод решения проблемы мультикоммивояжёра в среде без препятствий на основе уменьшения размера пространства решений / Ф. А. Хуссейн, В. А. Костюков, И. Д. Евдокимов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1(237). – С. 181-192. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-181-192. (K2)

3. Хуссейн, Ф. А. Гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжёра / Ф. А. Хуссейн, В. А. Костюков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 2 (244). – С. 193-201. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-193-201. (K2)

4. Хуссейн, Ф. А. Разработка и исследование метода решения задачи целераспределения в многоагентной системе / Ф. А. Хуссейн, В. А. Костюков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 4(246). – С. 144-155. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-144. (K2)

Статьи в научных изданиях, включенных в Scopus, Web of Science

5. Хуссейн, Ф. А. Сравнительный анализ методов решения задачи целераспределения и маршрутизации для мультиагентных робототехнических систем / Ф. А. Хуссейн, В. А. Костюков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2025. – Т. 26, № 3. – С. 139-146. – DOI 10.17587/mau.26.139-146. (K1)

6. Trajectory Planning Algorithms in Two-Dimensional Environment with Obstacles / V. Pshikhopov, M. Medvedev, F. Houssein [et al.] // Informatics and Automation. – 2022. – Vol. 21, No. 3. – P. 459-492. – DOI 10.15622/ia.21.3.1. (K1)

Публикации в сборниках трудов конференций

7. Хуссейн, Ф. А. Разработка метода централизованного распределения задач в мультиагентных системах / Хуссейн Фирас Айманович // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении, "КомТех-2024": материалы

Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в двух томах. Т. 2. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2024. – С. 289-295.

8. Houssein, F. A. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space / F. A. Houssein, V. F. Kostyukov, I. D. Evdokimov // 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 01-04 July 2024, Vallette, Malta. – IEEE, 2024. – P. 1729-1733. – DOI 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.

Патенты/свидетельства (при наличии)

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680400 Российская Федерация. Программа распределения задач в мультиагентной системе на основе уменьшения размера пространства решений: № 2024669753: заявл. 22.08.2024; опубл. 28.08.2024 / Ф. А. Хуссейн. – EDN RPXQYY.

Работа Хуссейна Ф.А. соответствует двум пунктам п. 4. (Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта), и п. 5. (Разработка специального математического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта) паспорта специальности 2.3.1 - «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».