На правах рукописи

Германчук Мария Сергеевна

Знаниеориентированные модели многоагентной маршрутизации

Специальность 05.13.18 —
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2022

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент **Козлова Маргарита Геннадьевна**

Официальные оппоненты: **Муравник Андрей Борисович,** доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН), факультет физико-математических и естественных наук, Математический институт им. С. М. Никольского, директор

Соловьев Аркадий Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), факультет «Агропромышленный», кафедра «Теоретическая и прикладная механика», заведующий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)

Защита состоится «14» сентября 2022 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 333.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, а также на сайте http://www.science.vsu.ru/dissertations/10681/Диссертация_Германчук_М.С..pdf.

Автореферат разослан «20» июля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.038.20,
д-р физ.-мат. наук Шабров Сергей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности. Задача коммивояжера или Traveling Salesman Problem (TSP) имеет значимую историю теоретических исследований, алгоритмических разработок, обобщений и широких приложений. TSP является NP-трудной в сильном смысле, поэтому на ней проверяются новые идеи решения NP-трудных задач комбинаторной оптимизации (*ЗКО*). С другой стороны, TSP входит в модели маршрутизации вместе с другими задачами дискретной оптимизации. С TSP связаны классические красивые и сложные результаты по теории графов, решению экстремальных задач на них. Современные направления исследований относятся к многоагентным задачам маршрутизации (multiple TSP или $mTSP$) на сложных сетях (т. е. на графах, элементам которых приписаны некоторые величины: вес, длина, интенсивность) большой размерности и сложной структуры. Такие задачи относятся к классу задач дискретной оптимизации (*ЗДО*).

Объект исследования — задачи условной дискретной оптимизации.

Предмет исследования — многоагентные задачи маршрутизации типа TSP, $mTSP$.

Степень разработанности темы исследования. *ЗДО* возникают при планировании производства; оптимизации коммуникационной инфраструктуры; оптимизации работы исполнителей, агентов-коммивояжеров. Разработке и исследованию алгоритмов *ЗДО* и *ЗКО* посвящены труды А. А. Агеева, А. Ахо, В. Л. Береснева, Г. В. Генса, Э. Х. Гимади, Н. И. Глебова, А. Ю. Горнова, В. Г. Дейнеко, В. А. Емеличева, А. Н. Еремеева, Я. М. Ерусалимского, Ю. И. Журавлева, А. В. Кельманова, Д. Кнута, М. Я. Ковалева, А. Н. Колмогорова, А. А. Колоколова, А. А. Корбута, Ю. А. Кочетова, Н. Н. Кузюрина, А. А. Лазарева, Е. В. Левнера, В. К. Леонтьева, М. Либуры, Вл. Д. Мазурова, А. Б. Муравника, Дж. фон Неймана, В. А. Перепелицы, В. К. Попкова, С. В. Севастьянова, А. Л. Семенова, И. В. Сергиенко, И. Х. Сигала, В. А. Скороходова, А. Фиакко, М. Ю. Хачая, S. Arora, G. Cornuéjols, D. Hochbaum, B. Korte, B. K. Lovász, P. Raghavan, C. Thompson и многих др.

Среди методов решения *ЗДО*, *ЗКО* (методов отсечений, динамического программирования, ветвей и границ, декомпозиции, метода множителей Лагранжа) выделяются методы и алгоритмы локального поиска. Основополагающие результаты этого направления получены Ю. И. Журавлевым, который впервые ввел понятие и рассмотрел класс локальных алгоритмов, а также оценил их сложность. Дальнейшее развитие методов локального поиска получено А. Н. Антамошкиным, Ю. А. Кочетовым, О. Э. Семенкиной, B. Kernigahan, S. Lin, C. Papadimitriou, C. Tovey, M. Yannakakis и др.

Несмотря на множество результатов для $mTSP$ есть ряд направлений, требующих исследования.

Необходимо отметить, что массовые задачи TSP, $mTSP$ являются NP-полными. При этом индивидуальные экземпляры могут быть эффективно разрешимы с помощью точных, эвристических или комбинированных алгоритмов. Распознавать экземпляры задач с экспоненциальной или полиномиальной сложностью до численных расчетов практически невозможно. Исходя из того, что задача $mTSP$ является моделью некоторой реальной прикладной задачи, можно за счет переформулировки и снятия некоторых ограничений сразу представлять входные данные в виде, приводящем к полиномиально разрешимым задачам TSP или $mTSP$ и отдельно фиксировать ограничения, сильно ухудшающие разрешимость задачи, а также отдельно обрабатывать хорошие экземпляры и заведомо плохие. Такой подход требует формирования базы полиномиально разрешимых задач, их признаков, алгоритмов распознавания или формирования исходных данных в виде, допускающем полиномиальную разрешимость. Существенной является возможность снижения размерности этапа преобразований с экспоненциальной сложностью. Например, с помощью использования иерархичности модели, кластеризации сети, декомпозиции исходной задачи, распараллеливания процесса реализации алгоритмов. Используемые знания об исходной прикладной задаче, ее модели в виде условной *ЗДО* могут быть представлены в удобной форме, например, в виде продукций. При этом необходимо сочетание системы логического вывода с прецедентной информацией, синтезом продукционной системы знаний на базе прецедентной информации. В этой части подход опирается на исследования многих авторов и, в частности, на работы В. И. Донского, М. Г. Козловой. Для задач $mTSP$ в виде псевдобулевой оптимизации такой подход реализован в работе.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка прикладных моделей задач и алгоритмов многоагентной маршрутизации типа многих коммивояжеров в сложных сетях с учетом данных, фактов и знаний о структуре сети, специфике и ограничениях на прохождение маршрутов, имеющихся прецедентов.

Такая целевая установка предполагает решение следующих задач:

1. Структурировать известные и предложить новые обобщенные математические модели *TSP* или $mTSP$, в зависимости от возможности использования знаний о задаче, структуре сети, прецедентах.

2. Обосновать сведение обобщенной модели $mTSP$ к модели псевдобулевой оптимизации с ограничениями в виде дизъюнктивной нормальной формы (*ДНФ*) для теоретического обоснования методов и алгоритмов решения однокритериальных и многокритериальных задач маршрутизации.

3. Предложить схему по упрощению исходной задачи $mTSP$; сформировать набор алгоритмов, реализующих данную схему.

4. Провести программную реализацию набора алгоритмов решения задач *TSP* и $mTSP$; реализовать подход, основанный на кластеризации сети с последующим применением реализованных алгоритмов и провести квазиреальные эксперименты по анализу применяемых алгоритмов.

5. Применить предложенные модели и алгоритмы при разработке комплексов программ для решения прикладных задач.

Материалы и методы исследования. При выполнении работы применялись методы теории графов, дискретной оптимизации, математического и псевдобулевого программирования, методы кластеризации; метаэвристики и эволюционные алгоритмы, а также методология квазиреальных вычислительных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту, и их научная новизна.

1. Выделение класса постановок модельных задач *TSP*, $mTSP$ и алгоритмов их решения, пригодных для синтеза комбинированных алгоритмов, в которых учитываются: прикладной характер математических моделей, знания о модели и сложной структуре сети, прецедентные знания и возможность реоптимизации.

2. Обоснование представления $mTSP$ как модели псевдобулевой оптимизации, в которой часть ограничений (или все) могут быть заданы в дизъюнктивной нормальной форме, для которых процедура поиска и логического вывода о принадлежности к искомому решению является полиномиальной.

3. Процедура снижения размерности исходной задачи $mTSP$ с помощью кластеризации сложных сетевых структур и итерационного уточнения кластеров в зависимости от решения TSP на каждом кластере и в целом. Численная

реализация алгоритмов и проведение вычислительных экспериментов по кластеризации сети и построение решения $mTSP$.

4. Программные комплексы многоагентной маршрутизации для решения задач выбора наилучших туристических маршрутов по Крыму, многоагентной инфраструктурной маршрутизации в чрезвычайных ситуациях (*ЧС*), для исследования влияния политических мемов на пользователей Рунета.

Достоверность научных положений и выводов. В работе применялись математически обоснованные методы. Теоретически обосновано сведение задачи $mTSP$ к задаче псевдобулевой оптимизации с ограничением в виде *ДНФ* ограничением. Приближенные решения подтверждены вычислительными экспериментами на основе разработанных алгоритмов.

Теоретическая и практическая значимость состоит в теоретическом обосновании построения маршрутов многих коммивояжеров в одно- и многокритериальных постановках на базе сведения к задачам псевдобулевой дискретной оптимизации с *ДНФ* ограничениями.

Предложено алгоритмическое наполнение и программная реализация в рамках схемы снижения размерности с помощью декомпозиции, согласованной с $mTSP$. Результаты применены для разработки программных комплексов прикладных задач: многоагентной инфраструктурной маршрутизации в *ЧС*, построению наилучших туристических маршрутов и исследованию влияния политических мемов на пользователей Рунета («Memometrix»). Получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ «Программа многоагентной инфраструктурной маршрутизации» № 2022614174 от 17.03.2022 г., «Программа выбора наилучших туристических маршрутов по Крыму» № 2021681822 от 27.12.2021 г. и акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на следующих конференциях: Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов» (г. Москва, 2019 г., 2021 г.), 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» (г. Москва, 2020 г.), Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2020 г., 2021 г.), Международная школа-симпозиум «Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем» (г. Судак, 2015 г., 2017–2020 гг.), Научно-практическая конференция «Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование» и Таврическая научная конференция студентов и молодых специалистов по математике и информатике (г. Симферополь, 2017–2019 гг.), Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Дистанционные образовательные технологии» (г. Ялта, 2018–2020 гг.), Международная открытая конференция «Современные проблемы анализа динамических систем. Теория и практика» (г. Воронеж, 2019 г.), III Международная научная конференция «Осенние математические чтения в Адыгее» (Майкоп, 2019 г.), V Международная научно-практическая конференция «Информационные системы и технологии в моделировании и управлении» (г. Ялта, 2020 г.), научный семинар кафедры информатики (г. Симферополь, 2016 г., 2022 г.)

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в рекомендуемых ВАК РФ рецензируемых научных изданиях [1—6; 9]. Проиндексированы в Scopus [7; 8; 10]. Сведения об остальных публикациях можно найти в диссертации.

Личный вклад автора. Автором диссертации совместно с научным руководителем проводилась постановка задач, обсуждались полученные основные результаты и формулировки выводов. Лично автором доказана сводимость задачи $mTSP$ к задаче псевдобулевой оптимизации с *ДНФ* ограничением. Автором обоснован подход к решению задач $mTSP$ на базе логической системы продукций. В силу сложности $mTSP$ на инфраструктурных сетях предложена схема снижения размерности задачи. Разработанные и апробированные в работе алгоритмы применены при разработке программных комплексов «Программа многоагентной инфраструктурной маршрутизации», «Программа выбора наилучших туристических маршрутов по Крыму».

Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 5.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки):

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 150 страницы, включая 49 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 255 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснован выбор темы и ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, отмечена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, раскрыты методологическая база, методы и приемы исследования, изложены основные научные положения, защищаемые в диссертационной работе.

В **первой главе** приводятся базовые определения, понятия, факты и модели, связанные с многоагентной маршрутизацией (типа коммивояжеров). Вводится рабочее определение знаниеориентированных моделей $mTSP$: *знаниеориентированными называются такие задачи TSP или $mTSP$, для решения которых используются представления знаний о структуре сети, априорные, прецедентные, аппроксимационные*; *знания о решении близких задач, а также знания, приводящие к выделению полиномиально разрешимым классам задач, которые могут быть представлены в любой удобной форме, например, в виде логической системы продукций.*

В *TSP* требуется найти замкнутый маршрут (т. е. начинающийся и заканчивающийся в одном городе) коммивояжера, проходящий через все города (вершины графа) по одному разу и имеющий минимальную длину.

Показано, что необходим набор достаточно простых и реализуемых моделей, направленных на снижение размерности исходной задачи так, чтобы было возможно использовать полиномиальные алгоритмы. Выделены различные обобщения *TSP*, в которых используется информация (знания). В ряде случаев решение задачи для нескольких коммивояжеров предваряет задача кластеризации исходного графа на два или несколько подграфов. Кластеризация необходима для декомпозиции задачи при ее большой размерности.

Отмечается важность учета знаний о решениях, компонентах моделей, структуре сложных сетей для разработки перспективных алгоритмов маршрутизации. Приведены полиномиальные модели TSP.

Наиболее общими являются модели псевдобулевой оптимизации $mTSP$. Разнообразие задач диктуется классами графов, моделирующих транспортные сети; структурой графов, их размерностью, возможностью декомпозиции; характером целевых функций и полнотой информации о коэффициентах критериев; возможностью представления знаний об ограничениях на сети в виде дизъюнктивных нормальных форм (*ДНФ*). Использование дополнительной информации (знаний) по обязательным ограничениям усложняют задачу.

Многоагентный подход к решению TSP при расположении всех агентов в одной вершине-депо. Пусть дан граф $G = (V,U)$, где V — множество вершин $V = 0,1,\ldots,n$, и U — множество дуг (ребер) и $C = (c_{ij})$ — матрица весов (расстояний), связанная с каждой дугой $(i,j) \in U$. Пусть m коммивояжеров расположены в вершине-депо $i = 0$. Многоагентный подход к решению TSP при расположении всех агентов в одной вершине-депо включает в себя нахождение всех маршрутов для m коммивояжеров таких, что они начинаются и заканчиваются в одной вершине. Все остальные вершины распределены по конкретным маршрутам. Количество вершин, посещаемых агентом, находится в пределах предопределенного интервала и общая стоимость посещения всех вершин минимизируется. Пусть

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{если агент проходит по дуге } (i,j), \\ 0, \text{в противном случае;} \end{cases}$$

u_i — количество вершин, посещенных от источника до вершины i (т. е. номер посещения i-й вершины); L — максимальное количество вершин, которые коммивояжер может посетить; K — минимальное количество вершин, которые коммивояжер должен посетить, то есть $K \leq u_i \leq L$.

Формализация многоагентной $mTSP$ в этом случае имеет вид:

$$\min \sum_{(i,j)\in U} c_{ij}x_{ij}, \tag{1}$$

$$\sum_{j=2} x_{1j} = m, \quad \sum_{j=2} x_{j1} = m, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1} x_{ij} = 1, \quad j = 2,\ldots,n, \tag{3}$$

$$\sum_{j=1} x_{ij} = 1, \quad i = 2,\ldots,n, \tag{4}$$

$$u_i + (L-2)x_{1i} - x_{i1} \leq L-1, \quad i = 2,\ldots,n, \tag{5}$$

$$u_i + x_{1i} + (2-K)x_{i1} \geq 2, \quad i = 2,\ldots,n, \tag{6}$$

$$x_{1i} + x_{i1} \leq 1, \quad i = 2,\ldots,n, \tag{7}$$

$$u_i - u_j + Lx_{ij} + (L-2)x_{ji} \leq L-1, \quad 2 \leq i \neq j \leq n, \tag{8}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in U, \tag{9}$$

$$f(x) = 1, \quad x = (x_{11}, x_{12},\ldots,x_{nn}). \tag{10}$$

Целевая функция (1) минимизирует общее пройденное расстояние в маршруте. Условия (2) гарантируют, что m коммивояжеров начинают и заканчивают свой путь в одной вершине. Уравнения (3) и (4) являются ограничениями посещения вершин. Условия (5) и (6) накладывают ограничение на количество вершин, которые коммивояжер посетит (при $u_i = 1$, если i — первая вершина в маршруте). Ограничение (7) не позволяет коммивояжеру посещать только одну вершину. Неравенство (8) гарантирует, что $u_j = u_{i+1}$, тогда и только тогда, когда $x_{ij} = 1$. Таким образом, ограничения запрещают формирование каких-либо подмаршрутов между вершинами в $V \backslash \{1\}$. Условие (10) задает ограничения и дополнительные условия в виде *ДНФ*.

Выясняется проблематика интеллектуального управления в многоагентных системах типа $mTSP$ и специфика взаимодействия агентов в решении сетевых задач маршрутизации. На уровне системы интересы (цели, критерии) коммивояжеров-агентов общие, локальные интересы отдельного агента представлены локальными целями, работающие на общую цель (которую агенты могут и не осознавать). При этом локальные цели, критерии, ограничения и ресурсы общедоступны для всех агентов. Оптимальность многокритериального решения достигается за счет обмена информацией (знаниями) между агентами-коммивояжерами с помощью процедуры самоорганизации или некоторой другой.

Агентная задача многих коммивояжеров на изменяющейся сети (в условиях чрезвычайных событий) естественно возникает, когда в рамках большой сетевой системы реализуется оптимальная сеть (синтез сети). На базе известных решений проводится реоптимизация относительно добавления вершин, дуг, внутренних условий (*ДНФ* ограничений), знаний, по количеству коммивояжеров-агентов. Устойчивость задач или оптимальных решений позволяет строить эффективные алгоритмы.

Рассмотрен вопрос интеллектуального управления агентами в MAC. Перспективным является подход, в котором агенты-коммивояжеры рассматриваются как популяция в рамках модели генетического алгоритма (GA).

Вторая глава является базовой как с теоретической точки зрения, так и для обоснования разработки алгоритмов $mTSP$ и управления агентами-коммивояжерами.

Псевдобулевые оптимизационные модели с сепарабельными целевыми функциями и *ДНФ* ограничениями, имеющими ограниченную постоянной длину, являются полиномиально разрешимыми. Представляют интерес классы задач, которые приведены или легко приводятся к форме с *ДНФ* ограничениями, так как в общем случае такие приведения являются экспоненциальными. Синтез модели с *ДНФ* ограничениями из данных можно осуществлять приближенно, и сложность такой аппроксимации оказывается полиномиальной. При этом показано, что число конъюнкций в извлеченной *ДНФ* не превышает числа примеров в исходной прецедентной информации, а для построения *ДНФ* ограничений целесообразно использовать решающие деревья. В случае монотонности и линейности частично заданной целевой функции в работах В. И. Донского и М. Г. Козловой предложены алгоритмы решения задач псевдобулевой скалярной оптимизации при наличии неполной, прецедентной начальной информации. Методология такого подхода применена для решения многоагентных задач типа многих коммивояжеров. Ограничимся *TSP*, формализованной в виде модели линейной псевдобулевой условной оптимизации с неотрицательными коэффициентами ($c_{ij} \geqslant 0$) целевой функции

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \to \min, \tag{11}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \ \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \ i,j = \overline{1,n}, \tag{12}$$

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leqslant n - 1, \ i,j = \overline{2,n}, \ i \neq j. \tag{13}$$

Здесь u_i — произвольные числа, соответствующие нумерации вершин маршрута *TSP*. Для упрощения выкладок, используется обозначение двухиндексных величин через одноиндексные: $\tilde{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_N) = (x_{11}, x_{12}, \ldots, x_{nn}) \in B^N$, $c = (c_1, c_2, \ldots, c_N) = (c_{11}, c_{12}, \ldots, c_{nn})$, где $N = n^2$. Ограничениям можно поставить в соответствие функции $F_j(\tilde{x}) \in P_2(N)$, $j = \overline{1,M}$, где M — число ограничений. Можно в $\tilde{x}$ использовать и другую нумерацию элементов: x_{ij}, $i,j = \overline{1,n}$.

Лемма 1. (2.1) *Если*

$$\left\{\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1,\ \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1,\ i,j = \overline{1,n},\ u_i - u_j + nx_{ij} \leqslant n-1, \quad i \neq j\right\} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \{F_j(\tilde{x}) = 0\},$$

то F_j *— монотонные ФАЛ и задачу* (11)–(13) *можно записать в виде*

$$(c, \tilde{x}) \to \min,\ F_0(\tilde{x}) = \bigvee_{j=1}^{M} F_j(\tilde{x}) = 0, \tag{14}$$

где $c = (c_{11}, c_{12}, \ldots, c_{nn}) \equiv (c_1, c_2, \ldots, c_N)$, $\tilde{x} = (x_{11}, x_{12}, \ldots, x_{nn}) \equiv (x_1, x_2, \ldots, c_N)$ $(c,\tilde{x})$ *— скалярное произведение* $\left((c,\tilde{x}) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}\right)$, $F_0(\tilde{x})$ *— монотонная ФАЛ.*

Следствие 1. (2.2) *Утверждения леммы остаются справедливыми для моделей многих коммивояжеров.*

На базе сведения $mTSP$ к псевдобулевым задачам оптимизации с дизъюнктивными ограничениями разработан алгоритм $AmTSP$, использующий идеологию кластеризации сети, преобразования $mTSP$ к псевдобулевой модели с ограничениями, представленными дизъюнктивной нормальной формой, и дальнейшего решения, основанного на алгоритмах полиномиальной сложности. Решение задачи $mTSP$ после кластеризации можно осуществлять по схеме, представленной на рис. 1.

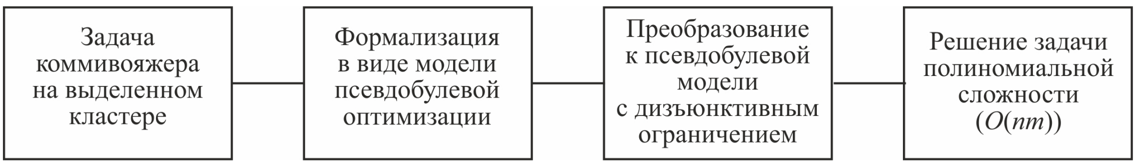

Рис. 1 — Схема решения задачи $mTSP$

Задача каждого коммивояжера на выделенном кластере является задачей скалярной псевдобулевой условной оптимизации, т. е. может быть представлена в канонической форме с дизъюнктивными ограничениями:

$$f_k(\tilde{x}) = (c^k, \tilde{x}) = \sum_{i=1}^{n_k}\sum_{j=1}^{n_k} c_{ij}^k x_{ij} \to min, \quad \bigvee_{j=1}^{m_k} x_{j_1}^{\sigma_{j_1}} \& \ldots \& x_{j_{r_j}}^{\sigma_{j r_j}} = 1, \quad k = \overline{1,m}. \tag{15}$$

Каноническая модель является исчерпывающей в своем классе в силу полноты. Левая часть ограничения (15) является *ДНФ* характеристической функции множества Ω^k — ограничений искомой задачи на k-ом кластере, в которой уже учтена дополнительная информация о структуре кластера и искомого решения (запреты, предписания и др.). Рассмотрим алгоритм решения таких задач.

В случае общих интересов модель будет однокритериальной:

$$f_0(\tilde{x}) = \sum_{k=1}^{m} f_k(\tilde{x}) \to min, \quad \bigvee_{j=1}^{M} x_{j_1}^{\sigma_{j_1}} \& \ldots \& x_{j_{r_j}}^{\sigma_{j_{r_j}}} = 1. \qquad (16)$$

Процессом выбора решения будем называть поиск такого набора значений $\alpha \in X^N$, $X \in \{0{,}1\}$ признаковых предикатов, чтобы (одновременно или по отдельности):

— обращался в единицу один или несколько целевых предикатов;

— достигала экстремального значения несколько (или одна в однокритериальной постановке) псевдобулевых функций $f_k, k = \overline{1,m}$.

Единственное ограничение канонической модели (16) в виде *ДНФ* характеристического множества ограничений задает И/ИЛИ граф, которому соответствует логическая система продукций. Существование логической системы продукций (*ЛСП*)

$$\begin{cases} x_{j_1}^{\sigma_{j_1}} \ldots x_{j_{r_j}}^{\sigma_{j_{r_j}}} \to g_j, \\ g_j \to g_0,\ j = \overline{1,M} \end{cases}$$

позволяет выводить целевой факт $g_0 =$«$\tilde{x}$ — допустимое решение». Граф И/ИЛИ ограничения канонической модели задачи $mTSP$ является трехъярусным.

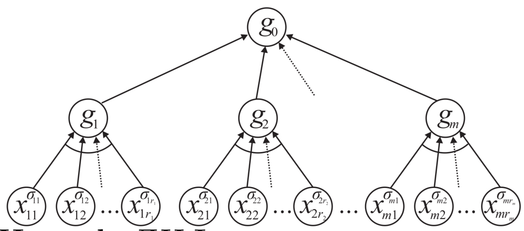

Рис. 2 — И/ИЛИ граф *ДНФ* ограничения канонической модели

Любой граф *ЛСП*, не имеющий циклов, может быть сведен к трехъярусному и представлен в виде *ДНФ*. Откуда следует, что соответствующая база знаний (*БЗ*) системы построения допустимого решения $mTSP$ должна удовлетворять следующим требованиям: 1) решения $mTSP$ должны удовлетворять ограничениям задачи, следовательно, *ЛСП* должна обеспечивать возможность вывода целевых предикатов, соответствующих этим ограничениям; 2) группа ограничений, которые должны выполняться одновременно, задаются вершиной типа «И», связывающей эти ограничения вместе.

Заметим, что *ДНФ* ограничение может быть получено с помощью обучения по прецедентной (эмпирической) информации. Для синтеза *ДНФ* по заданным *ЛСП* можно использовать D- и DS-алгоритмы, предложенные В. И. Донским, реализующие соответственно стратегии «сверху вниз» и «снизу вверх». То есть реализуется *синтез областей допустимости решений в знаниеориентированных продукционных системах моделей псевдобулевой условной оптимизации, соответствующих* $mTSP$ (с известной оценкой сложности).

Обоснованы методы решения многокритериальных задач $mTSP$, представленных в канонической форме. Приведем необходимое условие принадлежности точки множеству Парето в задаче безусловной оптимизации. Обозначим P_i множество номеров переменных, имеющих положительный, а N_i — множество номеров переменных, имеющих отрицательный коэффициент в линейной функции f_i, $i = \overline{1,m}$. Пусть

$$P_0 = P_1 \cap P_2 \cap \ldots \cap P_m, \quad N_0 = N_1 \cap N_2 \cap \ldots \cap N_m.$$

Лемма 2. (2.2) *Если для задачи безусловной многокритериальной оптимизации $mTSP$*

$$\begin{cases} \min f_1(\tilde{x}),\ \min f_2(\tilde{x}), \ldots,\ \min f_m(\tilde{x}) \\ \tilde{x} \in B^N,\ f_1, \ldots, f_m \in LPS_2(N) \end{cases} \tag{17}$$

множества P_0 и N_0 непусты и точка $\tilde{x}^*$ является паретовской, то она удовлетворяет уравнению

$$\left(\underset{i \in P_0}{\&} x_i \right) \left(\underset{i \in N_0}{\&} \overline{x}_i \right) = 1. \tag{18}$$

Теорема 1. (2.5) *Пусть в задаче $mTSP$ (17) существует непустое множество Парето $\mathcal{P}$, и к данной задаче добавляется ограничение $\tilde{x} \in \Omega$; $\Omega \neq \varnothing$; $\Omega \subset B^N$, $\Omega \neq B^N$. Для полученной задачи множество $\mathcal{P} \cap \Omega$, если оно не пусто, будет состоять только из паретовских точек.*

Подчеркнем, что задачи псевдобулевой оптимизации возникают как результат синтеза моделей $mTSP$ на основе индуктивного обобщения или построения логического описания области дедуктивной выводимости в системах, основанных на знаниях. В многокритериальной задаче

$$\begin{cases} \min f_1(\tilde{x}),\ \min f_2(\tilde{x}), \ldots, \min f_m(\tilde{x}), \\ \bigvee\limits_{j=1}^{m} x_{j_1}^{\sigma_{j_1}} \& \ldots \& x_{j_{r_j}}^{\sigma_{j_{r_j}}} = 1, \\ f_k \in LPS_2(N), \quad k = \overline{1,m}, \quad \tilde{x} \in B^N \end{cases} \tag{19}$$

необходимо найти паретовское множество $\mathcal{P}$ задачи (19), его логическое описание в виде *ДНФ* и подходов к выбору решения $\tilde{x}^* \in \mathcal{P}$. Для этого используем необходимое условие принадлежности точки множеству Парето и принцип ветвей и границ.

Для разреженных сетей или сетей с дугами существенно разного веса рационально применение алгоритмов максимального разреза для схемы кластеризации сети и последующего поиска с оптимальных маршрутов $mTSP$.

Прикладные алгоритмы маршрутизации с учетом информации приведены в **третьей главе**. Сравниваются, в частности, эвристические алгоритмы решения задачи поиска кратчайшего пути и задачи типа m коммивояжеров в случае наличия дополнительной информации. Такая информация меняет математическую постановку задачи и алгоритмы ее решения.

Обосновывается выбор алгоритмов приближенного решения. Предложен обобщенный алгоритм на приведенных сетях.

Алгоритм прикладной маршрутизации на приведенных сетях

Вход: *исходный граф $G(V,U)$ и весовая матрица C.*

Выход: *приближенное решение задачи ДО на графе $G(V,U)$.*

1: *Задать граф $G(V,U)$ и весовую матрицу C.*

2: *Найти преобразование* $\rho : \ C \to L$, *т. е. по матрице построить матрицу* L *с элементами* $l_{ij} \geq 0$, $(i,j) \in U$, *удовлетворяющими неравенству треугольника.*

3: *Учесть априорную информацию, запреты и предписания; преобразовать матрицу* L *в матрицу* $\tilde{L}$, *учитывающую данную информацию.*

4: *Провести анализ и упрощение матрицы* $\tilde{L}$ (*метрические характеристики; структурные составляющие: мосты, сочленения, висячие вершины; необходимость кластеризации*), *сформировать упрощенную матрицу* $\tilde{\tilde{L}}$.

5: *Для упрощенной матрицы* $\tilde{\tilde{L}}$ *решить задачу ДО.*

6: *Построить обратное соответствие* $\tilde{\tilde{L}} \to \tilde{L} \to C$ *и получить вариант решения, проверить на соответствие.*

7: *Предъявить приближенное решение исходной задачи ДО.*

Показана необходимость использования упрощающих схем и алгоритмов улучшения, компромисса применения композиции эвристических и точных алгоритмов. Описаны алгоритмы решения задач маршрутизации с ограничениями, приведен тестовый пример. В рамках существенного использования метаэвристик для $mTSP$ приведен их сравнительный анализ. Показаны версии алгоритмов, которые используются в программных реализациях. Осуществлен синтез алгоритмов кластеризации сети с учетом многоагентности, балансировки маршрутов. Проведена программная реализация алгоритмов синтеза кластеризации и многоагентной маршрутизации. Вычислительные эксперименты подтверждают обоснованность применения разработанных алгоритмов.

В **четвертой главе** даются приложения знаниеориентированных моделей к различным прикладным задачам маршрутизации. В задаче $mTSP$ в чрезвычайных условиях представлены реальные данные инфраструктуры Большой Ялты (Яндекс.Карты). Приводится пример реализации построения сбалансированных маршрутов для разного числа агентов. Разработан программный комплекс: «Программа многоагентной инфраструктурной маршрутизации» является решением задачи $mTSP$ для г. Ялты с прилегающими территориями в случае нескольких агентов-коммивояжеров. Многоагентность данных позволяет планировать реализацию функционала взаимодействия в MAC для имитации режимов чрезвычайных ситуаций.

Данный комплекс написан на языке программирования *Python* и является многоуровневым приложением. В архитектуре можно выделить три основных слоя: расчетный, главный и представление (рис. 3). Такая структура обеспечивает гибкое и удобное масштабирование в процессе использования продукта.

Главный слой представляет собой основной модуль, который отвечает за распределение задач, мониторинг их выполнения, оценку результатов. Этот слой получает на вход множество координат точек, которое отправляется в один или несколько расчетных модулей. Допускаются конвейерная обработка множества, то есть сначала данные обрабатываются первым расчетным модулем, потом вторым и так далее. На выход слой отдает последовательность, которая соответствует найденному субоптимальному маршруту для заданного числа коммивояжеров.

Расчетный слой состоит из множества расчетных модулей, каждый из которых реализует определенный алгоритм. Модуль на вход получает последовательность координат точек. В теле происходят необходимые вычисления и преобразования. На выход отдается преобразованная последовательность координат. Такая архитектура обеспечивает легкость добавления новых расчетных блоков. Расчетному модулю не нужно ничего знать о том, как данные будут

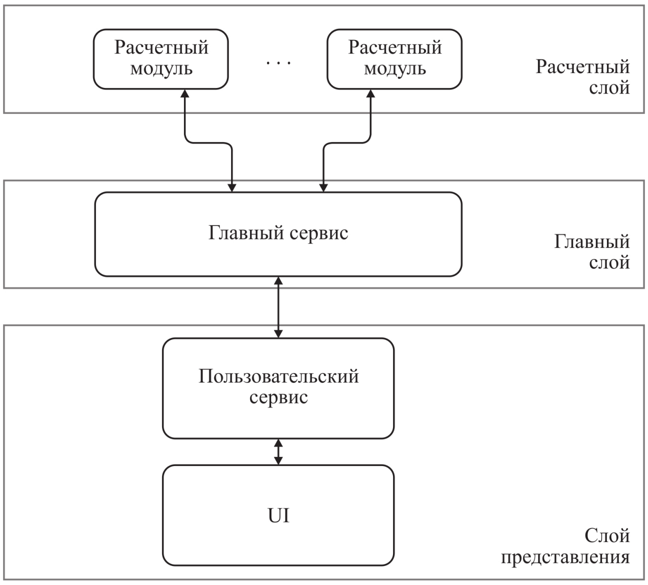

Рис. 3 — Архитектура программного комплекса многоагентной инфраструктурной маршрутизации

выглядеть для пользователя или какие модули будут дальше обрабатывать полученное множество. Это выполняется в главном слое. Аналогично, главный слой не содержит алгоритмы маршрутизации и внутренней реализации каждого из расчетных модулей или слоя представления. Этот слой оперирует данными и следит за тем, чтобы они попали туда, куда нужно.

Слой представления является клиент-серверным приложением. Клиентское приложение общается с главным слоем только через посредника, это позволяет всегда контролировать данные, которые получит клиент. На данном этапе сервер на выход отдает последовательность координат для каждого из объектов в городе Ялта и множество координат, которые соответствуют связи по автомобильной дороге, для каждой пары объектов.

Учет специфики географической информационной системы и $mTSP$ в программной реализации позволяет строить маршруты посещения достопримечательностей Крыма. Разработана «Программа выбора наилучших туристических маршрутов по Крыму», которая на основе данных о достопримечательностях, полученных из сервиса Яндекс.Справочник, а также на основе данных пользователя, составит оптимальный маршрут на несколько дней по достопримечательностям, с учетом их времени работы и желаемом времени посещения.

Рассмотренные в работе алгоритмы многоагентной маршрутизации на сложных сетях используются для анализа влияния потока интернет-мемов на пользователей интернет-сообществ. Разработан программный комплекс «Memometrix», предназначенный для мониторинга, анализа и оценки влияния на пользователей русскоязычного интернета распространяемых в социальных сетях мемов.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. Выделен класс постановок модельных задач *TSP*, $mTSP$ и полиномиальных алгоритмов их решения, пригодных для синтеза комбинированных алгоритмов, в которых учитываются: прикладной характер моделей, знания о модели и сложной структуре сети, прецедентные знания и возможность реоптимизации. Представлены исторические аспекты по *TSP*, их обобщениям, точным и приближенным алгоритмам решения.

В прикладной теории графов, предназначенной для решения различных задач прокладки маршрутов (замкнутых, разомкнутых, кратчайших, критических и т. п.) в сложных сетях возникает ряд ограничений, условий, предписаний: как в стационарном случае, когда задача решается заранее и при всех известных условиях, так и нестационарном, когда информация появляется в процессе прокладки маршрута. Такая информация может служить для формализации модельных ситуаций и быть наполнением для программных агентов по локальному поведению для достижения глобальной цели или группы, решающих общую задачу.

2. Обосновано представление $mTSP$ как модели псевдобулевой оптимизации, в которой часть ограничений (или все) могут быть заданы в виде *ДНФ* ограничений. При этом процедура поиска и логического вывода о принадлежности к искомому решению является полиномиальной.

Показано, что модели в виде псевдобулевой оптимизации с *ДНФ* ограничениями служат теоретической основой для MAC типа $mTSP$ и систем управления. Рассмотрены алгоритмы декомпозиции, кластеризации, анализа и синтеза сети в задачах типа многих агентов-коммивояжеров.

3. Разработана процедура снижения размерности исходной задачи $mTSP$ с помощью кластеризации сложных сетевых структур и итерационного уточнения кластеров в зависимости от решения TSP на каждом кластере и в целом.

Показано, что методология разработки алгоритмов решения задач маршрутизации может быть основана на формировании по исходной сложной сети более простой по своей структуре сети (относительно реализации алгоритмов маршрутизации).

Обоснована перспективность метода кластеризации в сочетании с метаэвристиками. В предположении, что проведена предварительная обработка сети с учетом ее структуры, т. е. найдено разбиение графа сети на подграфы (кластеризация), задача построения маршрутов коммивояжера решается на сети меньшей размерности. Сравнивается работа алгоритмов муравьиной колонии, имитации отжига, пчелиной колонии. Результаты по гибридным алгоритмам показывают возможность оптимизационной комбинации базовых алгоритмов.

4. Проведены численная реализация алгоритмов (точных, эвристик, метаэвристик) и вычислительные эксперименты по кластеризации (максимальный разрез и другие) для построения решений $mTSP$. Разработана программная реализация алгоритмов кластеризации: иерархический алгоритм, K-*means* и жадный алгоритм с различными модификациями. Реализован генетический алгоритм для решения *TSP*, а также синтез алгоритмов кластеризации и решения *TSP* с нахождением оптимальных центров. Обмен информацией между агентами реализован в виде механизма «перебрасывания» вершин из более крупных кластеров в более мелкие.

При наличии статистики распределения весов (дуг) сети эффективным является использование процедур максимального разреза. Найденные маршруты могут повторно использоваться, т. е. адаптироваться к изменяющимся условиям с целью получения маршрутов полиномиальной сложности. На базе реализованных алгоритмов проведен вычислительный эксперимент, результаты которого подтверждают практическую пригодность принятого подхода.

5. Разработаны программные комплексы: «Программа многоагентной инфраструктурной маршрутизации», «Программа выбора наилучших туристических маршрутов по Крыму», «Программный комплекс Memometrix для исследования влияния политических мемов на пользователей Рунета».

Список литературы

1. *Германчук, М. С.* Использование дополнительной информации в задачах дискретной оптимизации типа многих коммивояжеров / М. С. Германчук // Таврический вестник информатики и математики. — 2016. — Т. 33, № 4. — С. 68—82.
2. *Германчук, М. С.* Разрешимость задач псевдобулевой условной оптимизации типа многих коммивояжеров / М. С. Германчук // Таврический вестник информатики и математики. — 2020. — Т. 49, № 4. — С. 30—55.
3. *Германчук, М. С.* Синтез алгоритмов кластеризации для решения многоагентной задачи коммивояжера / М. С. Германчук, М. Г. Козлова // Таврический вестник информатики и математики. — 2018. — Т. 39, № 2. — С. 49—70.
4. *Германчук, М. С.* Программные инструменты и технологии анализа потока интернет-мемов / М. С. Германчук, М. Г. Козлова, В. А. Лукьяненко // Таврический вестник информатики и математики. — 2020. — Т. 48, № 3. — С. 37—58.
5. *Германчук, М. С.* Псевдобулевые модели условной оптимизации для класса задач многих коммивояжеров / М. С. Германчук, М. Г. Козлова, В. А. Лукьяненко // Автомат. и телемех. — 2021. — № 10. — С. 25—45.
6. *Германчук, М. С.* Метаэвристические алгоритмы для многоагентных задач маршрутизации / М. С. Германчук, Д. В. Лемтюжникова, В. А. Лукьяненко // Проблемы управления. — 2020. — Т. 6. — С. 3—13.
7. *Germanchuk, M. S.* Identification and prediction of an internet meme flow life cycle / M. S. Germanchuk, M. G. Kozlova, V. A. Lukianenko // CEUR Workshop Proceedings. — 2021. — Vol. 2914. — P. 112—123.
8. *Germanchuk, M. S.* Some features of design of intelligent systems for processing the internet memes flow / M. S. Germanchuk, M. G. Kozlova, V. A. Lukianenko // CEUR Workshop Proceedings. — 2021. — Vol. 2834. — P. 148—158.
9. *Kozlova, M. G.* Building a transport network model using satellite images / M. G. Kozlova, M. S. Germanchuk // Taurida Journal of Computer Science Theory and Mathematics. — 2020. — Vol. 47, no. 2. — P. 7—18.
10. *Kozlova, M. G.* Development of the toolkit to process the internet memes meant for the modelling, analysis, monitoring and management of social processes / M. G. Kozlova, V. A. Lukianenko, M. S. Germanchuk // “Recognition and Perception of Images. Fundamentals and Applications” / ed. by I. B. Abbasov. — USA : Wiley, 2021. — P. 189—220.