

о диссертации Германчук Марии Сергеевны «Знаниеориентированные модели многоагентной маршрутизации», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность и научная новизна исследования

Многочисленные приложения, в которых необходимо построить оптимальные или рациональные разомкнутые и замкнутые маршруты в сложно структурированных сетях большой размерности определяют актуальность выбора и исследования многоагентных моделей маршрутизации типа коммивояжера (multiple Traveling Salesman Problem – *mTSP*). *NP*-сложность *TSP* и *mTSP* приводит к необходимости разработки алгоритмов решения, основанных на привлечении знаний о структуре сети, модели и специфике получения данных в прикладных задачах. Публикационная активность по исследованиям подтверждает актуальность данного направления. Модели, задачи, алгоритмы базируются на учете различного рода знаний сопутствующих прикладным задачам многоагентной маршрутизации. Новым является сведение *mTSP* к задачам псевдодобулевой условной оптимизации с *ДНФ* ограничениями, имеющими полиномиальную разрешимость и построение ряда алгоритмов, ориентированных на снижение размерности в однокритериальном и многокритериальном случаях. Обосновано представление *mTSP* как модели псевдодобулевой 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. 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). Обобщенные алгоритмы, представляющие собой сочетание методов декомпозиции (кластеризации), эвристик, эволюционных, генетических, роевых алгоритмов являются перспективными. Выде-

лен 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.

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.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением фундаментального математического аппарата теории дискретной и псевдодобулевой оптимизации, подтверждается численными экспериментами. Выводы не противоречат известным из литературы результатам.

Теоретическая и практическая значимость

В работе (гл. 2) обоснован выбор моделей псевдодобулевой условной оптимизации с $ДНФ$ ограничениями. Сведение TSP и $mTSP$ к таким моделям позволило дать теоретическое обоснование методов и алгоритмов решения однокритериальных и многокритериальных задач маршрутизации. Снижение размерности задачи предлагается проводить также на основе декомпозиции с использованием различного рода кластеризации, учитывающей знания о структуре сети и характере данных для конкретной модели $mTSP$. Такой подход требует использования различных точных и приближенных алгоритмов, использующих доступную информацию о прикладной задаче. Осуществлен выбор обобщенных моделей одного и многих коммивояжеров, в которых существенно используются знания для построения алгоритмов решения задач $mTSP$ на сложных сетях. Протестированные комбинации алгоритмов применены в реализации схем по упрощению исходной задачи $mTSP$, ее декомпо-

зиции (кластеризации) и приближенному решению задач маршрутизации с различного рода знаниями в сети.

Отметим прикладную направленность моделей и алгоритмов *mTSP*. Приведена реализация для задач маршрутизации в изменяющихся (чрезвычайных) условиях для реальных данных инфраструктуры Большой Ялты; разработки туристических маршрутов посещения достопримечательностей; проблематике распространения мемов в социальных сетях.

Общая характеристика работы

Во введении обосновывается выбор темы и ее актуальность, формулируются цели и задачи исследования, показана научная новизна диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость, раскрыты методологическая база, методы и приемы исследования, изложены основные научные положения.

В первой главе введены базовые понятия по многоагентной маршрутизации. Вводится рабочее определение знаниеориентированных моделей *mTSP*. 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).

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

Выясняется проблематика интеллектуального управления в многоагентных системах (*МАС*) типа *mTSP* и специфика взаимодействия агентов в решении сетевых задач маршрутизации.

Рассмотрен вопрос интеллектуального управления агентами в *МАС*. Перспективным является подход, в котором агенты-коммивояжеры рассматриваются как популяция в рамках модели генетического алгоритма.

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

Рассмотренные псевдоболевые оптимизационные модели с сепарабельными целевыми функциями и *ДНФ* ограничениями, имеющими ограниченную постоянную длину, являются полиномиально разрешимыми. Выделен класс задач, которые приведены или легко приводятся к форме с *ДНФ* огра-

нениями, так как в общем случае такие приведения являются экспоненциальными.

Затрагиваются вопросы синтеза модели с *ДНФ* ограничениями из данных. Сложность такой аппроксимации оказывается полиномиальной, 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 предлагается использовать алгоритмы решения задач псевдоболевой скалярной оптимизации при наличии неполной, прецедентной начальной информации, которые рассматривались в работах В. И. Донского и М. Г. Козловой. Методология такого подхода применена для решения многоагентных задач типа многих коммивояжеров.

Обоснованы методы решения многокритериальных задач *mTSP*, представленных в канонической форме.

Прикладные алгоритмы маршрутизации с учетом информации приведены в третьей главе. Сравняются, в частности, эвристические алгоритмы решения задачи поиска кратчайшего пути и задачи типа *m* коммивояжеров в случае наличия дополнительной информации. Обосновывается выбор алгоритмов приближенного решения. Предложен обобщенный алгоритм на приведенных сетях.

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 *МАС* для имитации режимов чрезвычайных ситуаций.

Указывается, что данный комплекс написан на языке программирования Python и является многоуровневым приложением. В архитектуре выделены три основных слоя: расчетный, главный и представление, что 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 возможность добавления новых расчетных блоков. Главный слой не содержит алгоритмы маршрутизации и внутренней реализации каждого из расчетных модулей или слоя представления. В этом слое отслеживается правильность доставки.

Слой представления является клиент-серверным приложением. 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.

Замечания

1. Без ущерба для работы можно было бы опустить часть материала, например, связанного с управлением в многоагентных системах, но подчеркнуть перспективность и важность дальнейших исследований в этом направлении.

2. В диссертации и автореферате приведена ссылка на работу из журнала «Таврический вестник информатики и математики» (2016. Т. 33, № 4. С. 68-82), где не указана информации о включении журнала в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук ВАК РФ.

3. В публикациях автора и соавторов (диссертация) [19], [20], [26], [32], [38] не указаны страницы.

4. В общей характеристике работы (автореферат) следовало заменить «Актуальность темы и степень ее разработанности» на «Актуальность темы», так как далее описывается «Степень разработанности темы исследования».

Приведенные замечания не снижают в целом положительной оценки данной диссертационной работы.

Заключительная оценка работы

Диссертация Германчук Марии Сергеевны представляет собой законченную научную квалификационную работу, которая удовлетворяет требованиям Положения (в редакции, утвержденной правительством РФ от 24.09.2013 г. № 842) «О порядке присуждения ученых степеней», к кандидат-

ским диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

«11» 08 2022 г.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета и их дальнейшую обработку

Официальный оппонент



Соловьев Аркадий Николаевич

доктор физико-математических наук

доцент, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный

технический университет»,

телефон: 8(863)2-738-525, <https://donstu.ru>,

тел. 8-863-2381509 (раб.), 8-904-5041638 (моб.),

e-mail: solovievarc@gmail.com

адрес 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Подпись А.Н. Соловьева удостоверяю:

Ученый секретарь

Ученого совета ДГТУ



В.Н. Анисимов