

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Тормагова Тимофея Алексеевича

на тему «Задачи полуопределенного программирования в спутниковой навигации и планировании путей колесных роботов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Актуальность темы. Размерности большинства прикладных задач сегодня таковы, что алгоритм построения их точного решения в большинстве случаев или не существует, или является недопустимо трудоемким для практического применения. Поэтому большинство получаемых для таких задач решений — приближенные. В этих условиях возрастает значение подходов к решению, при которых приближение, в том числе на этапе постановки задачи, позволяет выиграть в затратах вычислительных ресурсов. Практическую ценность такие подходы приобретают при наличии оценок точности получаемого приближения.

Одним из классов задач, для которых разработаны эффективные алгоритмы приближенного решения, являются задачи выпуклой оптимизации, в частности, задачи полуопределенного программирования. Однако многие практические задачи управления не являются выпуклыми, что часто приводит к их высокой вычислительной сложности и затрудняет получение решения в режиме реального времени. Один из методов решения проблемы — так называемая выпуклая релаксация, когда исходная невыпуклая задача сводится к выпуклой за счет ослабления части условий.

В настоящее время важными практическими областями, где возникают подобные проблемы, являются глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС) и робототехника. Так, задачи выбора оптимального созвездия спутников и конфигурации базовых линий по своей природе комбинаторны, и их прямое решение методом перебора теоретически возможно, но нереализуемо на практике с учетом размерности задачи и вычислительной трудоемкости. При планировании путей колесных роботов трудности связаны, в том числе, с необходимостью учета невыпуклых геометрических ограничений.

Этим обусловлена актуальность темы диссертационного исследования, направленного на разработку методов сведения задач выбора навигационных спутников, определения ориентации твердого тела и планирования траекторий колесных роботов к задачам полуопределенного программирования, что позволяет получать эффективные приближенные решения с оценками их точности и физической реализуемости.

Структура и основное содержание диссертации. Общий объем работы составляет 123 страницы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 119 наименований.

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы объект, предмет и цель исследования, положения, выносимые на защиту. Обоснована научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены сведения об апробации работы на научных семинарах и конференциях, а также о публикациях соискателя, в которых отражены результаты исследования.

В первой главе приведены постановки в общем виде задач класса полуопределенного программирования и его основных подклассов. Представлены сведения о методе выпуклой релаксации, включая классический пример полуопределенной релаксации задачи о максимальном разрезе графа, для которой известна гарантированная оценка качества получаемого решения. Приведен краткий обзор численных методов решения задач полуопределенного программирования.

Во второй главе исследована комбинаторная задача выбора рабочего созвездия навигационных спутников по критерию GDOP, решение которой в реальном времени с помощью полного перебора затруднено. Описаны ограничения существующих приближенных подходов, главным из которых является отсутствие надежных двусторонних оценок точности. Для решения этой проблемы предложен метод на основе выпуклой релаксации, сводящий исходную задачу к полуопределенному программированию и позволяющий получить строгую оценку качества приближенного решения. С использованием данного подхода разработан алгоритм выбора рабочего созвездия, применимость которого подтверждена экспериментально.

В третьей главе исследована комбинаторная задача выбора базовых линий для определения относительной ориентации твердого тела по данным спутниковой навигации. Показано, что ее точное решение методом полного перебора является вычислительно трудоемким при большом числе антенн. Для снижения вычислительной сложности предложена линейная релаксация ограничений, что позволяет применять существующие эффективные численные методы. На основе релаксированной постановки разработан приближенный алгоритм выбора базовых линий, работоспособность которого подтверждена вычислительным экспериментом.

В четвертой главе рассмотрено построение маршрутов для колесных роботов, выполняющих задачи точного земледелия. Предложен метод формирования путей на пологом рельефе с препятствиями на основе решения задач конического программирования второго

порядка, учитывающий ограничения на кривизну траекторий. Для маршрутизации роботов приведены приближенные алгоритмы. Результаты подтверждены полевыми экспериментами.

Следует отметить, что, несмотря на различную физическую природу рассмотренных приложений, все три задачи диссертации объединены единым системным подходом. Они образуют сквозной цикл навигационного обеспечения и управления движением автономного мобильного робота: от надежного позиционирования и определения пространственной ориентации до кинематически реализуемого планирования траекторий.

Основные результаты и их новизна. Основные новые результаты исследования, которые стоит отметить, следующие.

1. Разработан метод и алгоритм выбора рабочего созвездия спутников, обеспечивающий получение двусторонних оценок точности приближенного решения, что отличает его от существующих подходов.

2. Предложен метод и алгоритм выбора базовых линий при определении относительной ориентации твердого тела по данным спутниковой навигации, позволяющий выбрать их конфигурацию с наилучшей обусловленностью.

3. Разработан метод планирования путей колесного робота, новизна которого заключается в том, что условия на кривизну траектории заданы в виде конусных ограничений, а критерии задач оптимизации позволяют выполнять спрямление маршрутов и учитывать препятствия с одновременной минимизацией пропусков покрытия.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в формализации ряда актуальных задач навигации и управления движением колесных роботов в виде задач полуопределенного программирования. Практическая ценность работы состоит в создании эффективных алгоритмов, позволяющих решать данные задачи оптимизации в режиме реального времени.

Апробация и публикации. Основные результаты исследования докладывались на научных семинарах и конференциях, а также опубликованы в 17 работах. Из них три работы опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК (категория K1) по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» по физико-математическим наукам и в приравняемых к ним, и шесть докладов в сборниках трудов научных конференций, индексируемых базой библиографических данных Scopus.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа и положения, выносимые на защиту, соответствуют п. 2 и п. 4 паспорта научной специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

П. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

П. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Замечания по работе.

1. Невырожденность матрицы $H^T \text{diag}(x)H$ на множестве допустимых значений, требуемая для корректной постановки задачи 2.2 и используемая в доказательствах лемм 2.1, 2.3 и 2.4, описывающих основополагающие свойства задач 2.2, 2.3 и 2.4, обосновывается автором «спецификой задачи». Следуя общему уровню строгости изложения, уместно было привести доказательство этого свойства.

2. В задачах главы 3 для гарантии того, что выбранные базовые линии образуют остовное дерево, используются ограничения (3.13) или (3.14), число которых растет экспоненциально с ростом n . В экспериментах (раздел 3.4) рассматриваются только случаи $n = 4$ и $n = 5$. Как предложенный метод масштабируется на практические случаи с большим числом антенн и рассматривалась ли возможность использования методов отсечения, когда ограничения добавляются в задачу SDP динамически?

3. В разделе 4.3.6 (с. 89) сказано: «Алгоритм 4.1 на каждом этапе своей работы предполагает выбор изменения кривизны Δ . От того, как этот выбор произведен, зависит, сколько итераций алгоритма потребуется выполнить, прежде чем решение задачи будет найдено.» Однако случай, когда физически реализуемый путь (с кривизной, не превосходящей $u_{\max}$) в заданных границах не существует, и критерий останова алгоритма в этом случае в работе не обсуждаются. В разделе 4.5.3 автор демонстрирует успешное применение Алгоритма 4.1 и приводит эвристическую формулу для задания шага Δ . Неясно, каково поведение алгоритма, если на некоторой итерации m выражение $u_{\max}^{-1} - 0.09m$ в формуле (4.63) станет неположительным. В работе нет комментариев, какое среднее число итераций требуется для построения траектории в полевых экспериментах. Если необходимо значительное число итераций (каждая из которых включает решение задачи конического программирования), это может поставить под вопрос вычислительную эффективность метода в системах реального времени. Если же сходимость в типичных случаях достигается за 1–2 итерации, этот результат заслуживает отдельного акцента в тексте диссертации.

Отмеченные недостатки не снижают значимости работы и не влияют на общую положительную оценку проведенного исследования.

Заключение по работе. Считаю, что рецензируемая диссертация представляет собой законченную научную квалификационную работу, обладающую научной новизной и

имеющую теоретическое и прикладное значение. Автореферат корректно отражает основные результаты диссертации. По своему содержанию и полученным в ней результатам работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Тормагов Тимофей Алексеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Официальный оппонент,
профессор кафедры информационных технологий
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»,
доктор физико-математических наук по специальности
05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)», доцент


Седова Наталья Олеговна

«25» августа 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет»
432017, г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, корпус 1
Телефон: 8 (8422) 37-24-73
Email: sedovano@ulsu.ru

Подпись Седовой Натальи Олеговны заверяю
Ученый секретарь Ученого совета УлГУ



Литвинко О.А.