

ОТЗЫВ **официального оппонента**

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

В диссертационной работе Т.А. Тормагова рассмотрены три навигационные задачи, объединенные общим подходом к решению: задача сводится к задаче выпуклого программирования и затем решается одним из точных или приближенных методов. При этом выделены два класса задач выпуклого программирования, для которых известны достаточно эффективные методы: класс задач полуопределенного программирования и более узкий класс задач конического программирования 2-го порядка. В процессе решения активно используются линейные матричные неравенства.

Диссертационная работа включает введение, 4 главы, заключение и список литературы по теме, также включающий научные работы автора по теме диссертации.

Во введении автор приводит общие характеристики выполненного исследования (актуальность темы, цели и задачи работы, ее научная новизна и т.п.). Подчеркнуто, что навигационные задачи включают целочисленные переменные, — фактор, заметно повышающий трудоемкость алгоритмов. Одним из способов преодоления этой проблемы является релаксация, состоящая в замене целочисленных переменных действительными. Это позволяет понизить сложность задачи с экспоненциальной до полиномиальной. Ценой релаксации является приближенный характер решения, это, однако, дает приемлемый результат во многих навигационных задачах.

В первой главе диссертации описаны основные математические инструменты, используемые в диссертации: понятия положительно (неотрицательно) определенной матрицы, линейного матричного неравенства. Также приводятся постановки задач полуопределенного программирования, которые представляют собой минимизацию линейного функционала при линейных ограничениях в классе неотрицательно определенных матриц. Также описаны подходы к решению частично-целочисленных задач полуопределенного программирования путем их релаксации и методы решения задач полуопределенного программирования.

Во второй главе рассмотрена задача выбора навигационных спутников. Достаточно очевидно, что точность позиционирования с помощью навигационных спутников улучшается с увеличением количества спутников. В то же

время использование большого количества спутников заметно повышает трудоемкость расчетных алгоритмов, что является важным фактором в условиях ограниченности ресурсов для мобильных систем. Возникает задача выбора ограниченного количества спутников, которые дают наилучшую точность позиционирования. Такую задачу можно решать перебором различных групп спутников, что приводит к алгоритму сложности NP. Даже с учетом некоторых приемов сокращения множества переборов этот алгоритм оказывается неприемлемым и необходимо искать решения, близкие к оптимальным, которые можно получить более простым алгоритмом. Такие алгоритмы есть, они описаны в главе. Автор предлагает новый подход, который путем релаксации целочисленных переменных сводит задачу к задаче полуопределенного программирования. Подход позволяет не только получить решение, близкое к оптимальному, но и построить двусторонние оценки для получаемого решения и тем самым контролировать его качество. Разработанный автором метод был проверен в результате натурного эксперимента с использованием навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS.

В третьей главе рассмотрена задача выбора базовых линий, вытекающая из задачи определения ориентации мобильной системы на основании сигналов, получаемых от навигационных спутников на несколько разнесенных антенн. Базовые линии — это векторы, соединяющие разнесенные антенны. Сигналы от спутников позволяют вычислять координаты базовых линий в системе координат локального горизонта. Зная координаты базовых линий в системе координат самой мобильной системы, можно вычислить матрицу перехода из одной системы координат в другую и тем самым определить ориентацию мобильной системы. Возникает оптимизационная задача выбора ортогональной матрицы, наилучшим образом связывающей два набора координат системы векторов (задача Wahba). При фиксированном выборе базовых линий задача сводится к сингулярному разложению определенной матрицы. Однако выбор базовых линий важен, поскольку влияет на точность ориентации. Задача выбора базовых линий может быть сформулирована как задача частично-целочисленного программирования. В работе путем релаксации по целочисленным переменным она сводится к задаче полуопределенного программирования. На основе решения этой задачи строится алгоритм выбора базовых линий. Работоспособность предложенного алгоритма проверена в ходе вычислительного эксперимента.

В четвертой главе рассмотрена задача планирования путей, покрывающих заданную поверхность. В задаче учитывается ограничение на кривизну, вытекающее из особенностей некоторых мобильных систем, наличие препятствий. Задача разделяется на две: собственно планирование путей, покрывающих поверхность, и сборка из отдельных путей единого маршрута для одной или нескольких мобильных систем. Наиболее просто построить прямо-

линейные пути, однако криволинейные пути, учитывающие конфигурацию плоской области, могут быть более выгодны. В работе рассмотрена задача построения путей с помощью кубических сплайнов. Это позволяет достаточно просто контролировать возникающие особенности и кривизну пути. В работе получены необходимые и достаточные условия, связывающие параметры сплайна с ограничением на кривизну пути. С использованием этих условий поставлена задача конического программирования на построение соседнего пути. Предложен алгоритм деформации путей для обхода препятствий. В задаче маршрутизации (соединения параллельных путей) предложены несколько алгоритмов. В частности, задача переформулирована как задача частично-целочисленного программирования, которая путем релаксации сводится к задаче линейного программирования. Все описанные алгоритмы решения задачи планирования путей проверены в ходе натурального эксперимента с использованием трех мобильных роботов.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования.

Актуальность темы исследования. Три задачи, рассмотренные в диссертации, возникли в практической деятельности. Хотя на данный момент существуют определенные методы их решения, они не окончательны. Поэтому разработка новых подходов и методов в решении рассмотренных задач сохраняет свою актуальность.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация Т.А. Тормагова соответствует специальности ВАК 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (физико-математические науки) в части следующих пунктов паспорта специальности:

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

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

Научная новизна результатов исследования. Новым в диссертационной работе являются формулировки трех навигационных задач как задач полуопределенного программирования, а также оценки, показывающие точность решения задачи.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Главным теоретическим результатом диссертации является формализация трех практических навигационных задач. Практическая ценность работы заключается в разработке алгоритмов решения рассмотренных навигационных задач и в проверке их работоспособности в натурных экспериментах.

Достоверность результатов исследования. Текст диссертации построен традиционно для математических наук. Полученные результаты сформулированы в виде теорем и снабжены доказательствами. Все доказа-

тельства логически корректны, основаны на достоверных результатах. Они также подтверждены в процессе проверки соответствующих алгоритмов в вычислительных и натурных экспериментах.

Апробация результатов. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах. Всего по теме диссертации опубликовано 3 научные работы в научных изданиях категории К1, 6 публикаций в сборниках материалов научных конференций, индексируемых в Scopus. Результаты диссертации докладывались на ряде конференций международного и всероссийского уровней (Конференция Пятницкого, Всероссийское совещание по проблемам управления, конференция МФТИ «Радиотехника и компьютерные технологии» и др.), а также на научных семинарах.

Замечания по диссертационной работе. Замечаний по существу полученных результатов, а также по их обоснованию нет. Есть некоторые замечания, связанные с оформлением диссертации.

1. Описание решения задачи навигации по заданному набору спутников на с. 25–26 недостаточно аккуратно. Фактически это описание метода Гаусса — Ньютона в методе наименьших квадратов. Это итерационный метод, на каждом шаге которого решается система линейных уравнений (2.10). Со статистическими свойствами невязок уравнений это никак не связано. Следовало бы быть ближе к источнику (Гилл, Мюррей, Райт. Практическая оптимизация).

2. В разделе 2.5.2 система координат, названная полярной, на самом деле является сферической. Кроме того, применять к сферической (как и полярной) системе координат терминологию декартовой некорректно.

3. Ортогональную матрицу действительно можно записать через два угловых параметра. Но такое представление в разд. 3 (с. 55) на самом деле излишнее, поскольку не имеет какой-либо связи с дальнейшим.

4. Термин «достаточно пологий» на с. 67 неясен, его следовало уточнить.

5. Список работ автора по теме диссертации включен в общий список литературы. Однако следовало бы его сформировать отдельно, поскольку он играет важную роль в оценке диссертации.

6. Есть мелкие погрешности по тексту и опечатки (например, неудачное обозначение p на с. 27, ранее уже использованное для обозначения псевдодальности; двоякое написание китайской спутниковой системы и др.).

Заключение. Диссертация Т.А. Тормагова представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научные результаты. Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати и апробированы на научных конференциях и научных семинарах. Автореферат и научные публикации автора полностью отражают содержание диссертации. Диссертация соответствует специальности 2.3.1 — «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

По актуальности, научному уровню и содержанию диссертационная работа Т.А. Тормагова удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», а ее автор Тормагов Тимофей Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент
профессор кафедры «Математическое моделирование»
Федерального государственного автономного образова-
тельного учреждения высшего образования «Москов-
ский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский уни-
верситет)»,
доктор физико-математических наук, доцент



Канатников
Анатолий Николаевич
22 июля 2026 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.
Тел. +7 (499) 263-6633, доб. 37-86
skipper@bmstu.ru.



Подпись *Жаппаров А.Н.*

ЗАВЕРЯЮ
ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
И. В. Шагабудинов **ШАГАБУДИНОВ И. В.**
ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЕМНОЙ
УКСА
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА