

На правах рукописи

Голубков

Голубков Алексей Владимирович

Моделирование движения объекта по сложной траектории с обнаружением изменения и идентификацией режимов движения

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена на кафедре высшей математики
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Ульяновский государственный педагогический
университет им. И. Н. Ульянова»

Научный руководитель:

Цыганов Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Граничин Олег Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра системного программирования математико-механического факультета, профессор кафедры.

Крашенинников Виктор Ростиславович, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», кафедра «Прикладная математика и информатика», профессор кафедры.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится 28 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.278.02 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная р. Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <https://ulsu.ru/ru>, с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Волков Максим Анатольевич

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время задача адаптивного оценивания параметров движения объекта по сложной траектории в условиях зашумленности и неполноты измерений, а также непредвиденного изменения режима движения объекта является актуальной в силу важности ее практических приложений. Примерами таких приложений являются задачи судовождения¹ и робототехники², в которых оценивание траектории подвижного объекта и обнаружение момента его маневрирования является крайне важным из-за опасности непредвиденного изменения режима движения.

Задачи математического моделирования траекторий движущихся объектов, слежения за движущимися объектами, распознавания движущихся объектов, сопровождения целей являются актуальным предметом современных научных исследований³. В реальных практических задачах траектория движения объекта является сложной, в общем случае ее трудно представить какой-то конкретной математической моделью, пусть даже и нелинейной. В условиях, когда доступными для прямого наблюдения являются лишь неполные зашумленные измерения, один из основных подходов заключается в применении методов нелинейной фильтрации^{4,5,6}.

В настоящее время для моделирования и оценивания параметров движения объектов применяют гибридные модели. Гибридная модель — это математическая модель процесса или явления, основанная на сочетании различных математических объектов. Гибридные системы — математические модели систем управления, в которых “непрерывная динамика, порождаемая в каждый момент времени одной из априорно заданного набора непрерывных систем, перемежается с дискретными операциями, подающими команды либо на мгновенное переключение с одной системы на другую, либо на мгновенную перестройку с заданных текущих координат на другие координаты, либо на то и другое одновременно”⁷. Таким образом, решение задачи для нелиней-

¹ Семушин, И. В. Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения и управления судном / И. В. Семушин, Ю. В. Цыганова, К. В. Захаров // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2013. — № 4. — С. 90–112.

² Lu, J. Robot indoor location modeling and simulation based on Kalman filtering / J. Lu, X. Li // J. Wireless Com. Network — 2019. — no. 140.

³ Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации / А. А. Коновалов. — СПб. : Изд-во СПбГУ ЛЭТИ, 2013. —164 с.

⁴ Maybeck, P. S. Stochastic models, estimation and control / P. S. Maybeck. — New Jersey : Academic Press, Inc., 1982. — Vol. 3. — 291 p.

⁵ Липцер, Р. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы) / Р.Ш. Липцер, А.Н. Ширяев. — М. : Наука, 1974.

⁶ Васильев, К. К. Траекторная обработка на основе нелинейной фильтрации / К. К. Васильев, Н. В. Лучков // Автоматизация процессов управления. — 2017. — № 1(47). — С. 4–9.

⁷ Точилин, П. А. Задачи достижимости и синтеза управлений для гибридных систем / П. А. Точилин, А. Б. Куржанский. — МГУ, 2008.

ной системы может быть заменено решением такой же задачи для гибридной системы. Хотя в общепринятой терминологии гибридными называют системы со смешанным типом процессов (в непрерывном и дискретном времени), в данной работе под *гибридной стохастической моделью* будем понимать многорежимную модель, представляющую собой набор дискретных линейных стохастических моделей, каждая из которых отвечает за определенный режим движения объекта, то есть участок движения, который можно представить линейной моделью. Таким образом, сложная (в общем случае, нелинейная) траектория движения объекта аппроксимируется кусочно-линейной траекторией. Впервые такая идея для решения задачи моделирования траектории морского подвижного объекта с помощью линейной стохастической модели кругового движения была выдвинута в работе И. В. Семушина, Ю. М. Кроливецкой и Е. С. Петровой⁸. Рассмотренный подход к моделированию движения объекта имеет преимущество в том, что нелинейная в целом математическая модель заменяется набором линейных дискретных стохастических моделей, для которых на каждом участке для оценки параметров движения можно применять вместо нелинейных фильтров, имеющих неизбежные погрешности вычислений вследствие линеаризации, оптимальные алгоритмы дискретной калмановской фильтрации⁹. Однако указанный подход неизбежно влечет необходимость в решении другой задачи — скорейшего обнаружения момента изменения режима движения объекта и идентификации модели, соответствующей его новому режиму движения. В настоящее время задачи скорейшего обнаружения изменений функционирования динамических систем остаются актуальными¹⁰.

Степень разработанности темы исследования. Как известно, наибольшим быстродействием в решении задач обнаружения момента нарушения функционирования динамических систем отличаются методы, развитые в теории обнаружения изменений свойств случайных процессов, позволяющие оптимизировать структуру алгоритма по критерию скорейшего обнаружения нарушения. Впервые подобная проблема была рассмотрена в фундаментальной работе Е. С. Пейджа¹¹. Оптимальные правила остановки наблюдений, включая широко известную задачу о разладке, получены в работах Р. Ш. Липцера и А. Н. Ширяева¹². Теоретические аспекты данной проблемы рассмотрены в мо-

⁸ Семушин, И. В. Ориентированная на фильтрацию Калмана математическая модель установившейся циркуляции для анализа траектории / И. В. Семушин, Ю. М. Кроливецкая, Е. С. Петрова // Автоматизация процессов управления. — 2013. — № 4 (34). — С. 14–20.

⁹ Grewal, M. S. Kalman filtering: Theory and Practice Using MATLAB / M. S. Grewal, A. P. Andrews. — 4th edition. — John Wiley & Sons, Inc., 2015.

¹⁰ Detection of abrupt changes in autonomous system fault analysis using spatial adaptive estimation of nonparametric regression / A. Kalmuk, O. Granichin, O. Granichina, M. Ding // Proceedings of the American Control Conference (ACC). — Boston Marriott Copley Place, Boston, MA, USA, 2016. — P. 6839–6844.

¹¹ Page, E. S. Continuous inspection schemes / E. S. Page // Biometrika — 1954. — no. 2. — P. 100–114.

¹² Липцер, Р. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы) / Р.Ш. Лип-

нографиях М. Бассвиля и соавт.¹³, Р. Паттона¹⁴, И. В. Никифорова¹⁵. Подробный обзор существующих методов и подходов в области последовательного анализа приведен в работе Т.Л. Lai¹⁶.

Методы оценивания положения и скорости маневрирующего объекта описываются в литературе на протяжении многих десятилетий, отметим известную зарубежную монографию Y. Bar-Shalom, X.R. Li, T. Kirubarajan¹⁷. Популярным подходом к решению указанной задачи является метод многомодельного слежения. Другим классом задач, связанных с обнаружением изменения характеристик случайных процессов, являются задачи контроля. Разработке алгоритмов контроля в классе линейных стохастических систем посвящены работы И. В. Семушина, А. Г. Сквикова и Л. В. Калинина^{18,19,20}. Для решения задач контроля авторы используют подход, основанный на прерывистом режиме тестирования, заключающийся в применении процедур подозрения и состязания. Метод гарантированного по вероятностям ошибок первого и второго рода обнаружения и идентификации нарушений в классе линейных стохастических систем управления в процессе фильтрации разработан Ю. В. Цыгановой²¹. К. В. Захаровым²² предложена модификация алгоритма обобщенного отношения правдоподобия, имеющая динамическую границу срабатывания, зависящую от скорости маневра морской цели.

Несмотря на большое количество публикаций в области решения задач контроля стохастических систем, актуальными остаются вопросы разработки численно эффективных алгоритмов, которые позволяют получить качественные решения в условиях априорной неопределенности как внешней среды,

пер, А.Н. Ширяев. — М.: Наука, 1974.

¹³ Бассвиль, М. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / под. ред. М. Бассвиля, А. Банвениста; пер. с англ. И. Б. Вильховченко и др. / М. Бассвиль. — М.: Мир, 1989. — 278 с.

¹⁴ Patton, R. Fault Diagnosis in Dynamic Systems. Theory and Applications / R. Patton. — NJ: Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, 1989.

¹⁵ Никифоров, И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. — М.: Наука, 1983. — 199 с.

¹⁶ Lai, T. L. Sequential Analysis: Some Classical Problems and New Challenges / T. L. Lai // Statistica Sinica. — 2001. — no. 11. — P. 303–408.

¹⁷ Bar-Shalom, Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software / Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan. — New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

¹⁸ Семушин, И. В. Обнаружение нарушений на основе уравнений чувствительности фильтра Калмана / И. В. Семушин, А. Г. Сквиков, Л. В. Калинин // Измерительная техника. — 1997. — № 9. — С. 19–21.

¹⁹ Сквиков, А. Г. Обнаружение нарушений в моделях линейных стохастических систем в процессе фильтрации: Диссертация; кандидат техн. наук: 05.13.16 / А. Г. Сквиков; Место защиты: Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева, Самара. — 1996. — 147 с.

²⁰ Калинин, Л. В. Последовательное обнаружение и диагностика нарушений в гауссовской марковской модели движения: Диссертация; кандидат техн. наук: 05.13.16 / Л. В. Калинин; Место защиты: Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск. — 1996. — 147 с.

²¹ Цыганова, Ю. В. Метод обнаружения факта нарушения и его диагностики в линейных стохастических системах в процессе фильтрации / Ю. В. Цыганова // Вестник СГАУ. — 2009. — № 2(18). — С. 163–170.

²² Захаров, К. В. Динамическая настройка алгоритма обнаружения маневра морской цели / К. В. Захаров // Автоматизация процессов управления. — 2011. — № 4. — С. 23–30.

так и доступной информации об объекте и измерителе, а также в условиях ограничения возможностей вычислительных ресурсов как по времени, так и по объему требуемой памяти.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования являются математические модели процесса движения объекта по сложной траектории в условиях непредвиденного изменения режима движения. *Предмет* исследования — методы обнаружения изменения и идентификации режима движения на основе алгоритмов дискретной фильтрации калмановского типа.

Цель и задачи диссертационной работы. *Целью диссертационной работы* является разработка новых методов математического и компьютерного моделирования движения объекта по сложной траектории с возможностью скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения, в условиях неполной измерительной информации об объекте и непредвиденных изменений его режима движения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить *задачи*:

1. Построить гибридную (многорежимную) стохастическую модель движения объекта по сложной траектории, в которой каждый режим движения представлен дискретной линейной стохастической моделью в пространстве состояний. Задача включает построение новых дискретных линейных моделей кругового равномерного движения при повороте влево/вправо, а также анализ свойств гибридной стохастической модели.
2. Разработать алгоритм моделирования движения объекта по сложной траектории с оценкой параметров его движения по данным зашумленных измерений.
3. Разработать алгоритм оценивания параметров движения объекта по сложной траектории в случае, когда моменты возможного изменения режима движения известны. Разработать параллельную реализацию алгоритма.
4. Разработать алгоритм параметрической идентификации дискретных линейных моделей кругового равномерного движения при повороте влево/вправо.
5. Разработать численно эффективные алгоритмы обнаружения изменения и идентификации режима движения с ограниченным объемом банка фильтров Калмана. Задача включает построение и обоснование априорной оценки среднего объема банка фильтров Калмана и разработку численного метода для вычисления априорной оценки.
6. Разработать численно эффективные алгоритмы обнаружения изменения и идентификации режима движения с ограниченным множеством отношений правдоподобия. Задача включает построение новых выражений для вычисления отношения правдоподобия на основе численно устойчивых модификаций фильтра Калмана.

7. Реализовать разработанные алгоритмы моделирования, оценивания, обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории в виде специализированного комплекса программ.

Научная новизна. Основные результаты, полученные в работе, являются новыми. В частности, построены и исследованы новые дискретные линейные стохастические модели в пространстве состояний, описывающие равномерное круговое движение при повороте влево либо вправо. На основе предложенной гибридной стохастической модели разработан новый алгоритм моделирования и оценивания параметров движения объекта по сложной траектории. Получена и строго математически обоснована априорная оценка среднего объема банка фильтров Калмана. Разработан новый численный метод оценки среднего объема банка фильтров Калмана. Построены новые численно эффективные алгоритмы для решения задачи обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории. Показана практическая применимость известных метаэвристических алгоритмов для решения задачи параметрической идентификации математической модели кругового движения объекта при повороте влево/вправо. Разработан комплекс программ для моделирования и оценивания движения объекта по сложной траектории с возможностью скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Гибридная (многорежимная) стохастическая модель движения объекта по сложной траектории, включающая новые дискретные линейные модели режимов равномерного кругового движения при повороте влево либо вправо, и алгоритм математического моделирования и оценивания траектории движущегося объекта по неполным зашумленным измерениям в условиях изменения режима движения в заданные моменты времени.
2. Алгоритмы обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта при условии, что моменты изменения режима движения известны: 1) алгоритм оценивания параметров математической модели движения объекта по сложной траектории, состоящей из отдельных участков, на которых объект может двигаться в соответствии с одним из M возможных режимов движения; 2) параллельный алгоритм обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта, траектория которого состоит из участков равномерного прямолинейного и/или кругового движения при повороте вправо/влево с заданным радиусом.
3. Априорная оценка среднего объема банка фильтров Калмана в задаче обнаружения изменения и идентификации одного из M возможных режимов движения и численные методы вычисления оценки.
4. Алгоритмы решения задачи обнаружения изменения и идентификации

режима движения объекта при условии, что моменты изменения режима движения неизвестны: 1) алгоритм обнаружения и идентификации режима движения с ограниченным объемом банка фильтров Калмана; 2) алгоритм обнаружения и идентификации режима движения с ограниченным набором вычисляемых величин отношения правдоподобия, основанный на численно эффективных квадратно-корневой и UD-реализациях фильтра Калмана.

5. Специализированный комплекс программ для моделирования движения объекта по сложной траектории с возможностью эффективного оценивания параметров его движения за счет скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения, в случае неполных измерительных данных и непредвиденных изменений режима движения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» и п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» паспорта специальности научных работников 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечена строгими математическими доказательствами теоретических результатов, корректным применением математического аппарата и численных методов, сравнением результатов с результатами, полученными альтернативными методами, использованием современных методов разработки алгоритмов, а также использованием при разработке программного комплекса апробированного лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения. Все теоретические положения подтверждены результатами вычислительных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых методов и средств математического и компьютерного моделирования движения объекта по сложной траектории с возможностью скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения, в условиях неполной измерительной информации об объекте и непредвиденных изменений его режима движения.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов диссертационного исследования для решения прикладных задач слежения за объектами, задач судовождения и робототехники.

Методы исследования. Теоретические результаты диссертации получе-

ны с применением методов теории линейных дискретных динамических систем, методов математической статистики, вычислительной линейной алгебры, теории калмановской фильтрации, численных методов оптимизации. Для получения практических результатов использованы методы математического и компьютерного имитационного моделирования, современные технологии научного программирования.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и научных мероприятиях: • Международная конференция «Дифференциальные уравнения, математическое моделирование и вычислительные алгоритмы», Белгород, 25–29 октября 2021 г. • Научно-техническая конференция «Интегрированные системы управления», Ульяновск, 18–19 мая 2021 г. (доклад отмечен дипломом I степени). • XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», Москва-Ульяновск, 12–23 апреля 2021 г. (доклад отмечен грамотой). • Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Функциональный анализ и математическое образование» (ФАМО-2020), Ульяновск, 8–9 октября 2020 г. • VI международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020), Самара, 26–29 мая 2020 г. • II Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения», Тольятти, 22–24 апреля 2019 г. • XXI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (XXI КМУ 2019), Санкт-Петербург, Россия, 19–22 марта 2019 г. • V международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019), Самара, 21–24 мая 2019 г. • IV международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), Самара, 24–27 апреля 2018 г. • Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 18–20 декабря 2017 г. • VI Региональная научно-практическая конференция «Физико-математическое образование: школа – ВУЗ», Ульяновск, 22 апреля 2016 г.

Исследования по теме диссертации частично поддержаны грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты р_а № 16-41-730784, р_мк № 18-41-732001, р_мк № 18-41-732003, мол_а 18-37-00220, Аспиранты № 20-31-90132). Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе Ульяновского государственного педагогического университета им. И. Н. Ульянова при изучении дисциплин «Компьютерное моделирование в научных исследованиях» и «Математическое моделирование в естественно-научных и социально-гуманитарных исследованиях» студентами магистратуры факультета физико-математического и технологического образования, обучающимся по профилям «Методология математического образования»

и «Компьютерное моделирование и дизайн информационной образовательной среды».

Публикации. По теме исследования опубликованы 22 печатные работы, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 5 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и Web of Science, получены 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все основные теоретические результаты диссертационного исследования получены соискателем самостоятельно. Разработка программного комплекса осуществлялась совместно с научным руководителем. Постановка и проведение вычислительных экспериментов выполнены соискателем также самостоятельно. Анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка иллюстративного материала, списка таблиц, списка алгоритмов и одного приложения. Общий объем диссертации 153 страницы, включая основной текст на 148 страницах, 29 рисунков, 10 таблиц, 13 алгоритмов. Список литературы состоит из 100 источников.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы. Приводится обоснование актуальности темы исследования, формулируются цель, задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту; описываются теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, степень достоверности полученных результатов; приводятся сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе разработан метод математического моделирования движения объекта по сложной траектории на основе гибридной (многорежимной) стохастической модели.

В разделе 1.2 представлена гибридная стохастическая модель процесса движения объекта по сложной траектории. Рассмотрим движение объекта на плоскости. Введем следующие предположения: 1) траектория движения объекта является сложной, поскольку объект может менять режим своего движения в заранее неизвестные дискретные моменты времени; 2) отдельные участки траектории с одинаковым режимом движения являются достаточно длинными, то есть можно сказать, что движение объекта является квазистационарным; 3) на каждом таком участке движение объекта можно представить дискретной линейной стохастической моделью, описывающей один из возможных режимов движения. В общем случае рассмотрим M таких моделей.

Тогда движение объекта на всей траектории может быть описано *гибридной стохастической моделью*:

$$x_k = \Phi_p x_{k-1} + B_p u_{k-1} + G_p w_{k-1}, \quad p = 0, 1, \dots, M-1, \quad k = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где x_k — вектор параметров движения объекта, p — номер режима движения.

Рассмотрим следующие возможные режимы движения, определяемые матрицами-параметрами Φ_p, B_p, G_p модели (1): 1) режим остановки (объект не движется), 2) режим прямолинейного равномерного движения, 3) режим равноускоренного движения, 4) режим равномерного кругового движения при повороте влево и 5) режим равномерного кругового движения при повороте вправо. Дискретные модели для режимов 1–3 известны из литературы. Для режимов равномерного кругового движения (поворота влево/вправо) были построены новые дискретные *линейные* стохастические модели в результате развития результаты работы Семушина И.В. и соавт.²³

Утверждение 1. *Дискретная линейная модель вида*

$$x_k = \Phi_p x_{k-1} + B_p u_{k-1}, \quad k = 1, \dots, N,$$

соответствующая режиму кругового равномерного движения при повороте налево с заданным радиусом, определяется матрицами-параметрами

$$\Phi_p = \Phi(x_s, r, \tau) = \begin{bmatrix} \Phi_c & 0 \\ 0 & \Phi_c \end{bmatrix}, \quad \Phi_c = \begin{bmatrix} \cos \omega_n \tau & \omega_n^{-1} \sin \omega_n \tau \\ -\omega_n \sin \omega_n \tau & \cos \omega_n \tau \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$B_p = B_p^L = B(x_s, r, \tau) = \begin{bmatrix} (x_{1,s} - \omega_n^{-1} x_{4,s})(1 - \cos \omega_n \tau) \\ (\omega_n x_{1,s} - x_{4,s}) \sin \omega_n \tau \\ (x_{3,s} + \omega_n^{-1} x_{2,s})(1 - \cos \omega_n \tau) \\ (\omega_n x_{3,s} + x_{2,s}) \sin \omega_n \tau \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Утверждение 2. *Дискретная линейная модель вида*

$$x_k = \Phi_p x_{k-1} + B_p u_{k-1}, \quad k = 1, \dots, N,$$

соответствующая режиму кругового равномерного движения при повороте направо с заданным радиусом, определяется матрицами-параметрами

$$\Phi_p = \Phi(x_s, r, \tau) = \begin{bmatrix} \Phi_c & 0 \\ 0 & \Phi_c \end{bmatrix}, \quad \Phi_c = \begin{bmatrix} \cos \omega_n \tau & \omega_n^{-1} \sin \omega_n \tau \\ -\omega_n \sin \omega_n \tau & \cos \omega_n \tau \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$B_p = B_p^R = B(x_s, r, \tau) = \begin{bmatrix} (x_{1,s} + \omega_n^{-1} x_{4,s})(1 - \cos \omega_n \tau) \\ (\omega_n x_{1,s} + x_{4,s}) \sin \omega_n \tau \\ (x_{3,s} - \omega_n^{-1} x_{2,s})(1 - \cos \omega_n \tau) \\ (\omega_n x_{3,s} - x_{2,s}) \sin \omega_n \tau \end{bmatrix}. \quad (5)$$

²³ Семушин, И. В. Ориентированная на фильтрацию Калмана математическая модель установившейся циркуляции для анализа траектории / И. В. Семушин, Ю. М. Кроливецкая, Е. С. Петрова // Автоматизация процессов управления. — 2013. — № 4 (34). — С. 14–20.

В (2), (3) и (4), (5) τ — период дискретизации, s — момент смены режима движения, r — радиус поворота, $\omega_n = |v_s|/r > 0$ — угловая скорость в момент смены режима движения, модуль вектора скорости $|v_s| = \sqrt{v_{x_s}^2 + v_{y_s}^2}$, $x_{i,s}$ — i -й элемент вектора состояния дискретной модели в момент времени s .

Случайные возмущения в модели движения объекта по сложной траектории (1) представим дискретным белым шумом $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q_p)$, где $Q_p \geq 0$ — матрица ковариации шума w_k . Считаем, что шумовая составляющая может присутствовать во второй и четвертой компонентах вектора состояния x для моделей с постоянной скоростью движения, и в третьей и шестой компонентах для модели равноускоренного движения.

Далее будем считать, что наблюдения за объектом производятся дискретно во времени с постоянным интервалом $\tau \triangleq t_{k+1} - t_k$. Соответствующая модель измерений, доступных при наблюдении за объектом, может быть записана следующим образом:

$$z_k = H_p x_k + v_k, \quad (6)$$

где v_k — вектор ошибки измерения, $v_k \sim \mathcal{N}(0, R_p)$. Считаем, что измеряются только пространственные координаты объекта.

В разделе 1.3 проведен анализ свойств полной наблюдаемости и управляемости дискретных линейных систем, моделирующих отдельные участки сложной траектории.

В разделе 1.4 разработан *алгоритм 1* моделирования траектории движущегося объекта и оценивания параметров движения объекта по неполным зашумленным измерениям. Рассмотрены методы оптимальной дискретной фильтрации, применяемые для оценивания параметров движения объекта: стандартный алгоритм Калмана и две его численно устойчивые модификации (квадратно-корневой фильтр и UD-фильтр).

В разделе 1.5 представлены результаты численных экспериментов, подтверждающие работоспособность предложенного подхода к моделированию и оцениванию сложной траектории движущегося объекта. Раздел 1.6 содержит заключение и выводы к Главе 1.

Во второй главе исследуется задача обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории при условии, что моменты возможного изменения режима движения априорно известны.

В разделе 2.2 исследуется задача обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории. Предполагаем, что точных данных об объекте нет, доступны лишь зашумленные неполные измерения. Решение задачи получено в форме алгоритма, основанного на гибридной стохастической модели, последовательной обработке измерений в фильтре Калмана и проверке последовательного решающего правила.

Алгоритм 1. Моделирование движения объекта по сложной траектории

Вход: $k = 0$ (дискретное время), x_k , τ , Q , R , план траектории из K отрезков, соответствующих различным режимам движения, для p -го отрезка кругового движения задать радиус поворота r_p .

Выход: x — смоделированный вектор состояния модели движения объекта.

```
1 for  $p = 1, 2, \dots, K$  do
    // определить тип  $p$ -го отрезка траектории  $type$  и его длину  $length$ ;
2   if  $type = \text{РО}$  или  $type = \text{ПРД}$  или  $type = \text{РУД}$  then
3     for  $j = k + 1, \dots, k + length$  do
4       вычислить  $x_j$  согласно (1) и соответствующим модели режима матрицам
5     end for
6   else
7     определить значение радиуса поворота  $r_p$ ;
8     вычислить значение  $\omega_n = \sqrt{x_k(2)^2 + x_k(4)^2}/r_p$  и матрицу  $\Phi_p(\omega_n, \tau)$  согласно (2);
9     if  $t = \text{КРД-Л}$  then
10      вычислить матрицу  $B_p(\omega_n, x_k)$  согласно (3)
11    else
12      вычислить матрицу  $B_p(\omega_n, x_k)$  (5)
13    end if
14    for  $j = k + 1, \dots, k + length$  do
15      вычислить  $x_j$  согласно (1) и соответствующим модели режима матрицам
16    end for
17  end if
18  присвоить  $k = j$ 
19 end for
```

В разделе 2.3 с целью ускорения вычислений предложен новый параллельный алгоритм обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта, траектория которого состоит из участков равномерного прямолинейного и/или кругового движения при повороте вправо/влево с заданным радиусом. Параллельная структура алгоритма позволяет значительно ускорить обработку данных в режиме реального времени.

В разделе 2.4 рассмотрена задача оценивания параметров математической модели движения объекта по сложной траектории, состоящей из отдельных участков, на которых объект может двигаться в соответствии с одним из M возможных режимов движения. Разработанный алгоритм 2 представлен в общей форме, не зависящей от конкретных возможных режимов.

В разделе 2.5 показана практическая применимость известных метаэвристических алгоритмов для решения задачи параметрической идентификации математической модели кругового движения объекта при повороте влево/вправо. В качестве неизвестного параметра модели рассматривался радиус кругового движения. Раздел 2.6 содержит заключение и выводы по Главе 2.

В третьей главе разработаны алгоритмы обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории в предположении, что моменты изменения режима движения априорно неизвестны.

Алгоритм 2. Адаптивное оценивание параметров движения объекта

Вход: $x_0, r, \tau, \mathbf{T}, \alpha, \beta$.

Выход: оценки параметров движения по траектории \hat{X} .

```
1  $A := \ln \frac{1-\beta}{\alpha}, B := \ln \frac{\beta}{1-\alpha}$ 
2  $k := 1, \hat{x} := x_0, P := I, q_A := 0, prevMoment := 1$ 
3 for  $i := 1, \dots, \text{size}(\mathbf{T})$  do
4    $nextMoment := k + \mathbf{T}_i$ 
5    $isChanged := false$ 
6    $\mathbf{I}_{AB} := \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 
7    $\mathbf{F} := \text{setFilters}(\hat{x}, P, r, \tau)$ 
8   while  $(k < nextMoment) \ \&\& \ \text{not}(isChanged)$  do
9      $[\hat{x}, \mathbf{P}, \mathbf{N}, \Sigma] := \text{makeStep}(z_k, \mathbf{F}, \mathbf{I}_{AB})$ 
10     $\hat{x} := \hat{x}_{q_A}, P := \mathbf{P}_{q_A}$ 
11     $\hat{X}_k = \hat{x}$ 
12     $\Lambda := \text{calculateLambda}(\mathbf{N}, \Sigma, \mathbf{I}_{AB}, q_A)$ 
13     $[isChanged, q_A, \mathbf{I}_{AB}] := \text{makeDecision}(\Lambda, \mathbf{I}_{AB}, q_A)$ 
14     $k := k + 1$ 
15  end while
16  if  $isChanged$  then
17    for  $j := prevMoment, \dots, k - 1$  do
18       $[\hat{x}, P] := \text{makeStep}(z_j, \mathbf{F}, \{q_A\})$ 
19       $\hat{X}_j = \hat{x}$ 
20    end for
21  end if
22  for  $j := k, \dots, nextMoment - 1$  do
23     $[\hat{x}, P] := \text{makeStep}(z_j, \mathbf{F}, \{q_A\})$ 
24     $\hat{X}_j = \hat{x}$ 
25  end for
26   $k := nextMoment$ 
27   $prevMoment := nextMoment$ 
28   $P := I$ 
29 end for
```

В разделе 3.2 представлено решение задачи обнаружения изменения и идентификации режима движения в неизвестные моменты времени с ограниченным объемом банка фильтров Калмана. В данной задаче момент изменения режима движения неизвестен, следовательно, каждый дискретный момент времени на интервале наблюдения за объектом будем рассматривать как момент возможного изменения режима движения.

Предлагаемый метод решения задачи обнаружения изменения режима движения основан на применении последовательного критерия отношения вероятностей Вальда. Для обнаружения изменения режима движения необходимо в каждый дискретный момент времени добавлять в банк фильтров Калмана новый фильтр, соответствующий гипотезе об изменении режима движения. Таким образом, количество фильтров Калмана в банке неограниченно возрастает с увеличением интервала наблюдения за объектом.

Определим *банк фильтров Калмана* $\mathbf{F} = \{F_j \mid j = 1, \dots, N\}$ как множество фильтров Калмана, каждый из которых соответствует гипотезе о том, что изменение режима движения произошло в текущий момент времени t_j . Поскольку количество фильтров в банке постоянно растет с увеличением длины N интервала наблюдения за объектом, возникает необходимость в отыскании оценки объема банка фильтров Калмана, необходимого для решения задачи обнаружения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Рассмотрим возможность изменения режима движения на интервале $t_i \in [t_0, t_N]$, при этом момент изменения режима движения t_j неизвестен. Кроме основной гипотезы \mathcal{H}_0 , соответствующей отсутствию изменения режима движения, рассмотрим $N - 1$ альтернативных гипотез \mathcal{H}_j . Таким образом, в каждый момент времени t_j предполагаем, что может произойти изменение режима движения с основного на альтернативный, соответствующий гипотезе \mathcal{H}_j . Рекуррентное выражение для логарифмической функции отношения правдоподобия в этом случае имеет вид:

$$\lambda_{j0}(t_k) = \lambda_{j0}(t_{k-1}) + \mu_{j0}(t_k), \quad k \geq 1. \quad (7)$$

Таким образом, в банке фильтров в каждый момент находится $j + 1$ фильтров Калмана, каждый из которых участвует в вычислении отношения правдоподобия (7). Следовательно, размер банка \mathbf{F} непрерывно и неограниченно растет с каждым шагом наблюдения за объектом. Это, в свою очередь, ведет к постоянному росту объема вычислений. Следовательно, практическая реализация такого алгоритма на достаточно длинном интервале наблюдения потребует больших вычислительных затрат. Более того, при $N \rightarrow \infty$ такое точное решение невозможно реализовать на практике.

В разделе 3.3 с целью разработки эффективного в вычислительном плане решение задачи обнаружения изменения режима движения объекта с ограниченным объемом банка фильтров Калмана построена априорная оценка среднего объема банка \mathbf{F} , в котором будут находиться “рабочие” фильтры, то есть те, которые участвуют в вычислении $\lambda_{j0}(t_k)$. Получено строгое математическое доказательство полученного результата.

В разделе 3.4 получено решение задачи обнаружения изменения и идентификации режима движения в неизвестные моменты времени с ограниченным объемом банка фильтров Калмана.

Рассмотрим M гипотез $\mathcal{H}_0, \dots, \mathcal{H}_{M-1}$, при этом гипотеза \mathcal{H}_0 соответствует номинальному (основному) режиму движения, а $M - 1$ гипотез \mathcal{H}_q соответствуют возможным альтернативным режимам движения. Чтобы оценить средний объем выборки, требуемый для принятия решения о выборе из $M - 1$ гипотез, необходимо сначала знать среднюю величину изменения логарифмической функции отношения правдоподобия $\lambda_{qj0}(t_k)$ после каждого шага теста

для каждого фильтра из банка:

$$\lambda_{qj0}(t_k) = \lambda_{qj0}(t_{k-1}) + \mu_{qj0}(t_k),$$

то есть для решения задачи необходимо вычислить приращения $\mu_{qj0}(t_k)$ функции отношения правдоподобия при условии выполнения гипотезы \mathcal{H}_0 или \mathcal{H}_q .

Предположим, в некоторый фиксированный момент времени t_j произошло изменение режима движения с основного (соответствующего гипотезе \mathcal{H}_0) на один из альтернативных режимов (соответствующий гипотезе \mathcal{H}_q , $q = 1, \dots, M - 1$). Далее, без потери общности, индекс j опускаем.

Утверждение 3. *Предположим, что в уравнениях фильтра используются значения параметров $\Phi_q, G_q, Q_q, H_q, R_q$, соответствующие одной из альтернативных гипотез \mathcal{H}_q , вместо значений параметров $\Phi_0, G_0, Q_0, H_0, R_0$, соответствующих гипотезе \mathcal{H}_0 . Тогда приращения $\mu_{0q}(t_k)$ и $\mu_{q0}(t_k)$ отношений правдоподобия $\lambda_{q0}(t_k)$ ($q = 1, \dots, M$) при условии выполнения гипотез \mathcal{H}_0 или \mathcal{H}_q в задаче обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта определяются выражениями*

$$\mu_{0q}(t_k) = \ln |\Sigma_0(t_k)|^{1/2} - \ln |\Sigma_q(t_k)|^{1/2} + \frac{1}{2} \left\{ m - \sum_{u,v=1}^m \left(\tilde{\sigma}_{uv}^q(t_k) \bar{\sigma}_{uv}^{q0}(t_k) \right) \right\} \quad (8)$$

и

$$\mu_{q0}(t_k) = \ln |\Sigma_0(t_k)|^{1/2} - \ln |\Sigma_q(t_k)|^{1/2} + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{u,v=1}^m \left(\tilde{\sigma}_{uv}^0(t_k) \bar{\sigma}_{uv}^{0q}(t_k) \right) - m \right\}. \quad (9)$$

Алгоритм 3 позволяет вычислить количественную оценку среднего объема банка фильтров Калмана. Результаты компьютерного моделирования, проведенного на языке MATLAB, показали, что решение задачи обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта при выбранных условиях вычислительного эксперимента потребует в среднем не более 30 фильтров Калмана ($KFBsize \leq 30$). Таким образом, если длина интервала наблюдения $N \gg 30$, то предложенное решение задачи будет эффективным.

В разделе 3.5 предложен второй подход к построению эффективного решения задачи обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта на ограниченном множестве отношений правдоподобия. Для решения задачи применяется критерий отношения вероятностей. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является способность принимать решения на ограниченном наборе значений функции отношения правдоподобия.

Алгоритм 3. Априорная оценка среднего объема банка фильтров Калмана в случае M возможных режимов движения объекта

Вход: α, β , набор матриц $\{\Phi_q, G_q, Q_q, H_q, R_q\}$, $q = 0, \dots, M - 1$.

Выход: M_q – априорная оценка среднего объема банка фильтров.

- 1 Вычислить $A = \ln((1 - \beta)/\alpha)$ и $B = \ln(\beta/(1 - \alpha))$.
- 2 Найти ковариационную матрицу невязок измерений Σ_0 , соответствующую основной гипотезе \mathcal{H}_0 , и ковариационные матрицы невязок измерений Σ_q , соответствующие альтернативным гипотезам \mathcal{H}_q , $q = 1, \dots, M - 1$, по уравнениям дискретного фильтра Калмана.
- 3 Вычислить значения фактических корреляционных матриц $\bar{\Sigma}_{0q}$, по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{0q}(t_k) = & H_0 \mathbb{E} \{x(t_k)x^T(t_k)\} H_0^T - H_0 \mathbb{E} \{x(t_k)\hat{x}^T(t_k^-)\} H_q^T \\ & + H_q \mathbb{E} \{\hat{x}(t_k^-)\hat{x}^T(t_k^-)\} H_q^T - H_q \mathbb{E} \{\hat{x}(t_k^-)x^T(t_k)\} H_0^T + R_q, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\hat{x}(t_k^-)$ – оценки, вычисленные с помощью фильтра F_q , соответствующего гипотезе \mathcal{H}_q .

- 4 Вычислить значения фактических корреляционных матриц невязок измерений $\bar{\Sigma}_{q0}(t_k)$ согласно уравнению:

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{q0}(t_k) = & H_q \mathbb{E} \{x(t_k)x^T(t_k)\} H_q^T - H_q \mathbb{E} \{x(t_k)\hat{x}^T(t_k^-)\} H_0^T \\ & + H_0 \mathbb{E} \{\hat{x}(t_k^-)\hat{x}^T(t_k^-)\} H_0^T - H_0 \mathbb{E} \{\hat{x}(t_k^-)x^T(t_k)\} H_q^T + R_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\hat{x}(t_k^-)$ – оценки, вычисленные с помощью фильтра F_0 , соответствующего гипотезе \mathcal{H}_0 .

- 5 Найти величины μ_{0q} и μ_{q0} для каждой гипотезы \mathcal{H}_q , $q = 1, \dots, M - 1$, согласно выражениям (8) и (9), в которых матрицы $\Sigma_0^{-1} = [\tilde{\sigma}_{uv}^0]_{u,v=1,m}$ и $\Sigma_q^{-1} = [\tilde{\sigma}_{uv}^q]_{u,v=1,m}$; $\bar{\Sigma}_{0q} = [\bar{\sigma}_{uv}^{0q}]_{u,v=1,m}$ и $\bar{\Sigma}_{q0} = [\bar{\sigma}_{uv}^{q0}]_{u,v=1,m}$; $\bar{\Sigma}_{0q} = \lim_{t_k \rightarrow \infty} \bar{\Sigma}_{0q}(t_k)$ и $\bar{\Sigma}_{q0} = \lim_{t_k \rightarrow \infty} \bar{\Sigma}_{q0}(t_k)$ ($q = 1, \dots, M - 1$).
 - 6 Найти величины $N_{0q} = (\alpha A + (1 - \alpha)B)/\mu_{0q}$ и $N_{q0} = ((1 - \beta)A + \beta B)/\mu_{q0}$, где N_{0q} и N_{q0} – средние объемы выборок, необходимых для принятия решения при выборе из двух гипотез \mathcal{H}_0 и \mathcal{H}_q .
 - 7 Для каждой пары основной и альтернативной гипотезы \mathcal{H}_0 и \mathcal{H}_q , $q = 1, \dots, M - 1$, вычислить средний размер банка фильтров Калмана: $M_q = \max(\lceil N_{0q} \rceil, \lceil N_{q0} \rceil)$.
 - 8 Найти оценку среднего размера банка фильтров как максимальное значение M_q среди каждой пары гипотез \mathcal{H}_0 и \mathcal{H}_q , $q = 1, \dots, M - 1$.
-

Предположим, что момент возможного изменения режима движения и номер режима движения априорно неизвестны. Рассмотрим M возможных режимов движения ($q = 0, \dots, M - 1$). Пусть начальный режим движения имеет номер 0. Необходимо по результатам измерений подтвердить или опровергнуть факт изменения режима движения объекта и идентифицировать его номер. Решение задачи получено с помощью последовательного критерия отношения вероятностей Вальда.

Решающее правило имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \forall q \quad \lambda_{qk} \leq B, \text{ тест завершают с выбором гипотезы } \mathcal{H}_0 \\ \text{(изменение режима движения не обнаружено).} \\ \text{Если } \exists! i : \lambda_{ik} \geq A, \text{ тест завершают с выбором гипотезы } \mathcal{H}_i \\ \text{(обнаружено изменение режима движения на режим с номером } i\text{).} \\ \text{Если } \forall q \quad A > \lambda_{qk} > B, \text{ тест продолжают для следующего } k. \\ \text{Если } \exists i, n : \lambda_{nk} \geq A \text{ и } \lambda_{ik} \geq A, \text{ тест завершают с выбором гипотезы } \mathcal{H}_q, \\ \text{где } q = \max(i, n) \text{ (обнаружено изменение режима движения} \\ \text{на режим с номером } q\text{).} \end{array} \right. \quad (12)$$

Теорема 1. Предположим, что момент возможного изменения режима движения с номинального (с номером 0) на альтернативный (с номером q , $q = 1, \dots, M - 1$) представляет собой дискретную случайную величину θ , равномерно распределенную на отрезке $[1, k]$. Тогда отношение функций правдоподобия в решающем правиле (12) определяется выражением

$$\lambda_{qk} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \psi_j^q(k), \quad (13)$$

где

$$\psi_j^q(k) = \begin{cases} 1, & k < j, \\ \psi_j^q(k-1) \sqrt{\frac{|\Sigma_j^q(k)|}{|\Sigma_1^0(k)|}} \times \exp \left[\frac{(v_1^0(k))^T (\Sigma_1^0(k))^{-1} v_1^0(k) - (v_j^q(k))^T (\Sigma_j^q(k))^{-1} v_j^q(k)}{2} \right], & k \geq j. \end{cases} \quad (14)$$

С целью построения численно эффективного решения задачи получены новые выражения для вычисления величин (14), основанные на применении численно устойчивых модификаций фильтра Калмана.

Предложение 1. Пусть $\mathbf{SR} = \{F_{01}, F_{qj} | q = 1, \dots, M - 1, j = 1, \dots, k\}$ – банк квадратно-корневых фильтров Калмана, необходимый для вычисления значений отношений правдоподобия (13). Тогда выражение для величин (14) имеет вид:

$$\psi_j^q(k) = \begin{cases} 1, & k < j, \\ \psi_j^q(k-1) \times \frac{|(S_{R_{e,k}})_j^q|}{|(S_{R_{e,k}})_1^0|} \exp \left[\frac{\|(\bar{e}_k^{SR})_1^0\|^2 - \|(\bar{e}_k^{SR})_j^q\|^2}{2} \right], & k \geq j, \end{cases} \quad (15)$$

в котором невязки и квадратный корень ковариационной матрицы невязок получены с применением квадратно-корневого фильтра.

Аналогичный результат получен на основе UD-фильтра Калмана (Предложение 2). В этом же разделе разработаны алгоритмы обнаружения и идентификации режима движения, приведены результаты численных экспериментов. Раздел 3.6 содержит заключение и выводы по Главе 3.

В четвертой главе приводится описание комплекса программ для моделирования и оценивания движения объектов по сложной траектории с обнаружением изменения и идентификацией режима движения. Раздел 4.1 содержит описание программного комплекса «Моделирование и оценивание траектории подвижного объекта v1.1», разработанного на языке MATLAB. Пример работы представлен на рис. 1. В разделе 4.2 описана программа для реализации параллельного алгоритма оценивания параметров движения объекта. Раздел 4.3 содержит заключение и выводы по Главе 4.

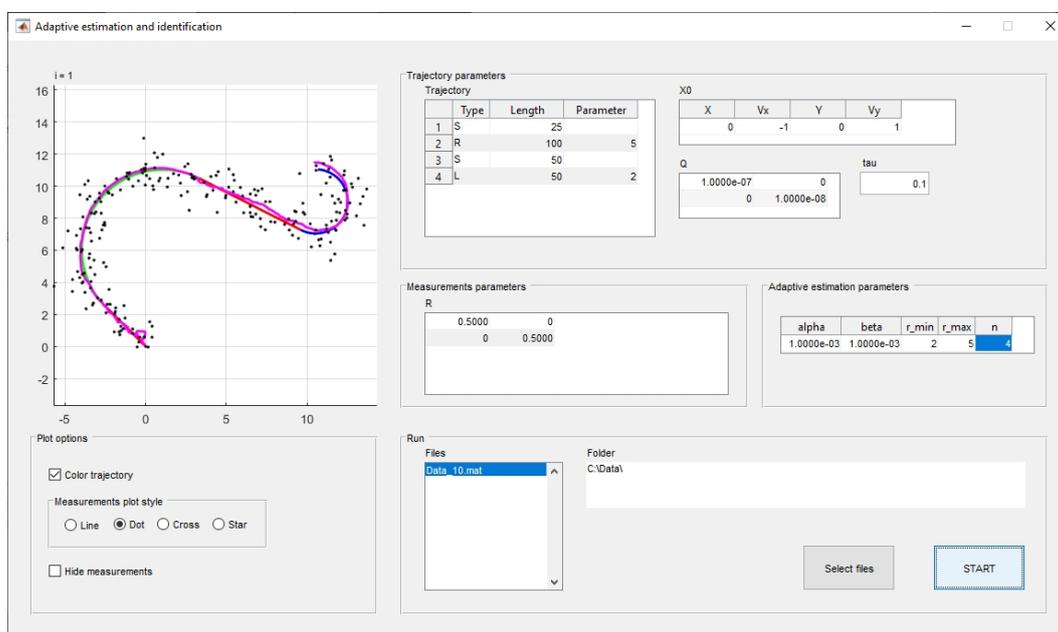


Рис. 1: Окно адаптивного оценивания траектории

Заключение

В диссертации разработаны новые методы моделирования движения объекта по сложной траектории с возможностью обнаружения изменения и идентификации режимов движения. Получены следующие результаты:

1. Построены новые дискретные линейные стохастические модели равномерного кругового движения при повороте влево либо вправо с заданным радиусом, представленные в пространстве состояний.
2. Проведен анализ свойств полной наблюдаемости и управляемости гибридной (многорежимной) стохастической модели.

3. Сформулирован и подтвержден на практике новый алгоритм математического моделирования траектории движущегося объекта, состоящей из отрезков равномерного прямолинейного, равноускоренного и кругового движения влево либо вправо с заданным радиусом.

4. Предложен новый алгоритм диагностики режима движения объекта на основе гибридной стохастической модели. Для вычисления множества отношений правдоподобия, участвующих в реализации решающего правила, использован численно эффективный последовательный алгоритм обработки измерений в фильтре Калмана, позволяющий одновременно с оценкой вектора состояния найти величины, необходимые для вычисления отношения правдоподобия.

5. Разработан новый параллельный алгоритм идентификации режима движения объекта в условиях неполных зашумленных измерений. Работоспособность предложенного алгоритма подтверждена компьютерным моделированием.

6. Разработан новый алгоритм решения задачи адаптивного оценивания параметров движения объекта по сложной траектории, состоящей из отдельных участков, на которых объект может двигаться в соответствии с одним из M возможных режимов движения. Алгоритм представлен в общей форме, не зависящей от количества возможных режимов.

7. Показана практическая применимость известных метаэвристических алгоритмов для решения задачи параметрической идентификации математической модели кругового движения объекта при повороте влево/вправо.

8. Предложено решение задачи скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения объекта по сложной траектории. Решение задачи основано на последовательном решающем правиле о выборе текущего режима движения в неизвестный момент времени, с ограниченным объемом банка фильтров Калмана.

9. Разработан численный метод вычисления априорной оценки среднего объема банка фильтров Калмана. Полученная априорная оценка рассматривается как необходимый конечный объем банка конкурирующих фильтров, при котором последовательное решающее правило позволяет обнаружить момент изменения режима движения. Получено строгое математическое обоснование полученной оценки.

10. Получены новые выражения для вычисления отношения правдоподобия на основе квадратно-корневого фильтра и UD-фильтра. Таким образом показано, как можно встроить численно эффективные модификации фильтра Калмана в решение задачи обнаружения и идентификации режима движения.

11. Разработан эффективный в вычислительном плане и гарантированный по вероятностям ошибок первого и второго рода алгоритм обнаружения факта изменения режима движения объекта в процессе фильтрации измери-

тельных данных. Решение основано на численно эффективных алгоритмах калмановской фильтрации. Преимущество метода заключается в том, что решение принимается на ограниченном множестве значений функции отношения правдоподобия.

12. Разработан специализированный комплекс программ для моделирования движения объектов по сложной траектории с обнаружением изменения и идентификацией режима движения.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science

1. Метаэвристические алгоритмы в задаче идентификации параметров математической модели движущегося объекта / А. В. Цыганов, И. В. Семушин, Ю. В. Цыганова [и др.] // Автоматизация процессов управления. — 2017. — № 1 (47). — С. 16–23. (ВАК)
2. Моделирование и оценивание траектории движущегося объекта / И. В. Семушин, А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математическое моделирование и программирование». — 2017. — Т. 10, № 3. — С. 108–119. (ВАК, WoS, Scopus)
3. Диагностика режима движения объекта на основе гибридной модели / А. В. Голубков, И. О. Петрищев, А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова // Вестник НГИЭИ. — 2017. — № 12 (79). — С. 22–31. (ВАК)
4. Golubkov, A. V. Adaptive estimation of an object motion parameters based on the hybrid stochastic model / A. V. Golubkov, A. V. Tsyganov, Yu. V. Tsyganova // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1096, no. 1. — P. 012166. (Scopus)
5. Adaptive estimation of a moving object trajectory using sequential hypothesis testing / A. V. Tsyganov, Yu. V. Tsyganova, A. V. Golubkov, I. O. Petrishchev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математическое моделирование и программирование». — 2019. — Т. 12, № 1. — С. 156–162. (ВАК, WoS, Scopus)
6. Decentralized multisensor estimation of motion parameters of an object moving along a complex trajectory / A. V. Golubkov, A. V. Tsyganov, Yu. V. Tsyganova, I. O. Petrishchev // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1368. — P. 042041. (Scopus)
7. Голубков, А. В. Решение задачи обнаружения изменения режима движения объекта с ограниченным объемом банка фильтров Калмана / А. В. Голубков // Автоматизация процессов управления. — 2020. — № 1 (59). — С. 14–23. (ВАК)
8. Golubkov, A. V. Algorithm for detecting a change in the motion mode of an object moving along a complex trajectory / A. V. Golubkov, A. V. Tsyganov, I. O. Petrishchev // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745, no. 1. — P. 012115. (Scopus)
9. Голубков, А. В. Об алгоритме обнаружения изменения режима движения объекта / А. В. Голубков // Автоматизация процессов управления. — 2021. — № 3 (65). — С. 49–55. (ВАК)

Публикации в других изданиях

10. Голубков, А. В. Программный комплекс для моделирования, оценивания и параметрической идентификации траектории движущегося объекта / А. В. Голубков, С. Д. Винокуров // Физико-математическое образование: школа – ВУЗ: Материалы VI Региональной

- научно-практической конференции (22 апреля 2016). — Ульяновск : Изд-во УлГПУ, 2016. — С. 16–19.
11. Параллельный алгоритм идентификации движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков, И. О. Петрищев, А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, Воронеж, 18–20 декабря 2017 г. — Воронеж : Научно-исследовательские публикации, 2017. — С. 340–347.
 12. Голубков, А. В. Адаптивное оценивание параметров движения объекта на основе гибридной стохастической модели / А. В. Голубков, А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова // Сборник трудов IV международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), Самара, Россия, 24–27 апреля, 2018. — Самара : Новая техника, 2018. — С. 2064–2074.
 13. Голубков, А. В. Анализ наблюдаемости гибридной стохастической модели движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием: 22–24 апреля 2019 г. В двух частях. Ч. 1. — Тольятти : Издатель Качалин Александр Васильевич, 2019. — С. 107–112.
 14. Голубков, А. В. Об оценке объема банка конкурирующих фильтров Калмана в задаче диагностики режима движения объекта на основе гибридной стохастической модели / А. В. Голубков // Навигация и управление движением. Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. редактор д. т. н. проф. О. А. Степанов / Под общ. ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. — СПб. : ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. — С. 302–304.
 15. Децентрализованное мультисенсорное оценивание параметров движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков, А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова, И. О. Петрищев // Сборник трудов V международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019), Самара, Россия, 21–24 мая, 2019. — Т. 3. — Самара : Новая техника, 2019. — С. 178–188.
 16. Голубков, А. В. Анализ гибридной стохастической модели движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков, И. В. Столярова // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. — 2019. — № 2. — С. 24–29.
 17. Голубков, А. В. Обнаружение изменения режима движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков, А. В. Цыганов, И. О. Петрищев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 26–29 мая): в 4 т. / Самар. нац.-исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем. обраб. изобр. РАН-фил. ФНИЦ "Кристаллография и фотоника"РАН; [под ред. В. А. Соболева]. — Т. 3. Математическое моделирование физико-технических процессов и систем. — Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2020. — С. 858–864.
 18. Голубков, А. В. Об оценке среднего времени принятия решения об изменении режима движения объекта [Электронный ресурс] / А. В. Голубков // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» / Отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. — М. : МАКС Пресс, 2021.
 19. Голубков, А. В. Обнаружение и идентификация режима движения объекта по сложной траектории / А. В. Голубков // Дифференциальные уравнения, математическое моделирование и вычислительные алгоритмы : сборник материалов международной конференции, Белгород, 25–29 октября 2021 г. / под ред. В. Б. Васильева, И. С. Ломова. — Белгород : ИД «БелГУ» НИУ «БелГУ», 2021. — С. 87–89.

Свидетельства о регистрации программ

20. Программный комплекс «Моделирование и оценивание траектории подвижного объекта v1.0» / А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова, С. Д. Винокуров, А. В. Голубков // РОСПАТЕНТ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660550 от 16.09.2016 г.
21. Цыганов, А. В. Программный комплекс «Моделирование и оценивание траектории подвижного объекта v1.1» / А. В. Цыганов, Ю. В. Цыганова, А. В. Голубков // РОСПАТЕНТ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665161 от 03.12.2018 г.
22. Голубков, А. В. Программа для реализации параллельного алгоритма адаптивного оценивания параметров движения объекта v1.0 / А. В. Голубков, А. В. Цыганов // РОСПАТЕНТ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616674 от 28.05.2019 г.

Научное издание

Голубков Алексей Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
«Моделирование движения объекта по сложной траектории с обнаружением изменения
и идентификацией режимов движения»

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ