

На правах рукописи

Куриненко Марианна Витальевна

**«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ
НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА С ОБУЧЕНИЕМ АЛГОРИТМА СТОХАСТИ-
ЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ПО НЕПЕРИОДИЧЕСКИМ ТОЧНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ»**

Специальность 2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный руководитель: **Соколов Сергей Викторович**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматика и телемеханика на
железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО
«Ростовский государственный университет
путей сообщения»

Официальные оппоненты: **Бушуев Сергей Валентинович**,
доктор технических наук, доцент, проректор
по научной работе ФГБОУ ВО «Уральский
государственный университет путей
сообщения»;
Юренко Константин Иванович,
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Автомобили и транспортно-технологические
комплексы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Защита состоится 08 декабря 2025 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.02 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.02
доктор технических наук, профессор

О.Н. Числов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие интеллектуальных транспортных систем является одним из ключевых факторов повышения конкурентоспособности транспортной отрасли и экономического роста. Технологии транспортных процессов играют важную роль в повышении эффективности транспортной системы, а их применение становится все более актуальным.

С целью развития транспортной системы России и повышения конкурентоспособности российских транспортных услуг на мировом рынке была разработана и утверждена «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» (далее – Транспортная стратегия). При реализации Транспортной стратегии учитываются современные тенденции в области международной экономической и транспортной политики, одной из основных целей которой в части развития новых технологий и решений является развитие инновационной железнодорожной инфраструктуры, подвижного состава и систем управления.

Внедрение спутниковой навигации на железнодорожном транспорте было определено постановлением Правительства от 25 августа 2008 г. № 641, согласно которому «автомобильные и железнодорожные транспортные средства, используемые для перевозки пассажиров, специальных и опасных грузов должны быть оснащены аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS».

Использование спутниковой навигации на железнодорожном транспорте позволяет: отслеживать перемещение подвижного состава, информировать пассажиров, грузоотправителей и грузополучателей о местоположении поездов, вагонов и грузов, контролировать соблюдение требований безопасности при управлении движением поездов. Применение интеллектуальных комбинированных информационно-управляющих навигационных систем, основанных на использовании инерциальных датчиков в совокупности с высокоточными приемниками спутниковой навигации, позволяет определять местоположение объекта при различных условиях и типах движений, в том числе в условиях полного отсутствия спутниковых навигационных сигналов в заданной точке местности, например, в тоннелях. Интеграция интенсивно развивающихся методов машинного обучения в традиционные способы обработки информации позволяет достигать необходимых точностей в определении параметров движения объекта, удовлетворяющих потребностям современных транспортных систем.

Таким образом, обеспечение получения надежной и высокоточной информации о местоположении объекта является одной из актуальных проблем современной навигации, а, следовательно, и транспортных систем в целом.

Степень разработанности темы исследования. В решение задачи построения интегрированных навигационных систем (НС), обеспечивающих высокоточное позиционирование, большой вклад внесли ученые Харисов В.Н., Перов А.И., Анучин Н.О., Емельянцева Г.И., Ярлыков М.С., Гупалов В.И., Гапанович В.А., Дмитриев С.П., Степанов О.А., Боронахин А.М., Уманский В.И., Демидов О.В. и др.

Вопросы регрессии (фильтрации) в машинном обучении в своих трудах рассматривали: Ковалев С.М., Уманский В.И., Попов В.А., Иванов В.Ф., Таран В.Н. и др.

В вопросах развития интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте большой вклад внесли: Баранов Л.А., Горелик А.В., Бестемьянов П.Ф., Никитин А.Б., Матюхин В.Г., Розенберг Е.Н., Воронин В.А., Долгий И.Д., Давыдов Б.И., Феофилов А.Н., Клепов А.В., Обухов А.Д. и др.

Объект исследования – интеллектуальные бортовые НС подвижных единиц железнодорожного транспорта (ПЕ ЖДТ) на основе интеграции неинерциальных, инерциальных и спутниковых НС.

Предмет исследования – алгоритмы машинного обучения интегрированных НС ПЕ ЖДТ на основе интеллектуальной адаптации (обучения) стохастического фильтра навигационных параметров с использованием непериодических точных наблюдений.

Цель исследования: повышение безопасности движения за счет разработки и использования интеллектуальной интегрированной навигационной системы ПЕ ЖДТ, обеспечивающей высокоточное позиционирование и определение угловой ориентации ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерения.

Основные задачи исследования. Достижение поставленной цели потребовало разработки нового подхода, обеспечивающего решение задачи интеллектуальной интеграции спутниковых (СНС), инерциальных (ИНС) и неинерциальных навигационных систем с целью высокоточного позиционирования и определения угловой ориентации ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерения, на основе решения следующих частных задач исследования:

1. Синтез полной нелинейной модели вектора состояния интегрированной НС, справедливой для произвольного временного интервала и характера движения ПЕ ЖДТ.

2. Разработка моделей автономных наблюдателей вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ для режимов интеллектуальной интеграции НС.

3. Анализ эффективности применения полных нелинейных моделей вектора состояния интегрированной НС и автономных наблюдателей вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерения.

4. Разработка интеллектуальных алгоритмов функционирования интегрированной НС ПЕ ЖДТ на основе методов теории навигации и адаптивной нелинейной стохастической фильтрации.

5. Разработка интеллектуальных алгоритмов интегрированных НС на основе обучения стохастического фильтра параметров движения ПЕ ЖДТ с использованием непериодических точных наблюдений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана полная нелинейная модель вектора состояния интегрированной НС ПЕ ЖДТ, инвариантная к характеру движения ПЕ ЖДТ и виду действующих возмущений.

2. Разработаны модели автономных наблюдателей вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ для различных режимов интеллектуальной интеграции НС.

3. Синтезированы интеллектуальные алгоритмы функционирования НС ПЕ ЖДТ в различных режимах интеграции на основе методов теории стохастической нелинейной фильтрации.

4. Разработаны интеллектуальные алгоритмы интегрированных НС на основе обучения стохастического фильтра параметров движения путем настройки коэффициента адаптации алгоритма фильтрации по непериодическим точным наблюдениям, а не традиционной замены вектора состояния оценок на известные измерения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные алгоритмы интеграции НС и обучения алгоритмов стохастической оценки навигационных параметров ПЕ ЖДТ с использованием непериодических точных наблюдений позволяют обеспечить высокоточное решение навигационной задачи ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерений навигационного комплекса.

Результаты исследования были использованы: при выполнении исследования, финансируемого грантом РФФИ 18-07-00126 А «Аналитическое адаптивное извлечение динамических знаний в нечетко-стохастических нелинейных средах на основе непериодических точных измерений»; в программном обеспечении двунаправленного интерфейсного преобразователя в составе распределенного контролируемого пункта (РКП ДИП).

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являются основные положения и методы теории инерциальной и спутниковой навигации, адаптивной калмановской фильтрации, машинного обучения, а также имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Синтезированная полная нелинейная модель вектора состояния интегрированной НС ПЕ ЖДТ за счет ее инвариантности к характеру ее движения и виду действующих возмущений обеспечивает возможность, во-первых, ее универсального использования в любых навигационных режимах без потери точности решения задачи навигации за счет традиционных упрощений модели, а во-вторых, возможность синтеза различных вариантов интеллектуальной интеграции неинерциальных, инерциальных и спутниковых НС, ориентированных на высокоточное решение навигационной задачи ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех.

2. Разработанные модели автономных наблюдателей вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ за счет комплексирования измерителей параметров движения на различных физических принципах обеспечивают, в отличие от существующих, возможность наблюдения всех навигационных параметров – как линейных, так и угловых. Это, в свою очередь, обеспечивает существенное повышение точности и устойчивости решения навигационной задачи ПЕ ЖДТ на основе методов стохастической фильтрации в различных режимах интеллектуальной интеграции НС по сравнению с традиционными схемами текущей оценки параметров движения ПЕ ЖДТ.

3. Синтезированные полная нелинейная модель вектора состояния интегрированной НС ПЕ ЖДТ и модели автономных наблюдателей вектора ее навигационных параметров обеспечивают принципиальную возможность строгого

решения задачи стохастической оценки полного вектора параметров движения ПЕ ЖДТ в различных режимах интеллектуальной интеграции НС на основе методов теории стохастической фильтрации.

4. Разработанные навигационные алгоритмы интеллектуальных интегрированных НС на основе обучения алгоритмов стохастической оценки параметров движения с использованием непериодических точных наблюдений позволяют существенно повысить точность решения навигационной задачи ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерений. Высокоточное позиционирование и определение угловой ориентации ПЕ ЖДТ обеспечиваются использованием разработанных навигационных алгоритмов, впервые обучающихся по непериодическим точным наблюдениям за счет настройки коэффициента адаптации алгоритма фильтрации, а не традиционной замены вектора состояния оценок на известные измерения.

Область исследования. Тематика работы соответствует паспорту научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы; технические науки:

1. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами.

6. Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического, информационного и других видов обеспечения интеллектуальных транспортных систем, систем управления транспортными технологическими процессами и транспортными средствами.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов подтверждается достаточной полнотой анализа области исследования, физической и математической обоснованностью поставленных задач, корректностью применения математического аппарата теории стохастической фильтрации, а также корректным проведением компьютерного моделирования и адекватностью полученных результатов требованиям, предъявляемым к существующим и перспективным НС ПЕ ЖДТ, положительным заключением экспертов на работы автора, включая заключения на отчет по исследованиям, финансируемым РФФИ, а также опубликованными работами в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, и докладами на всероссийских и международных конференциях.

Апробация результатов. Результаты диссертационного исследования обсуждались и были положительно оценены на международных научно-практических конференциях «Транспорт-2015», «Транспорт-2016», «Транспорт-2020» (г. Ростов-на-Дону), Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России» (г. Ростов-на-Дону), VII Международной научно-технической конференции «Технологии и разработки информационных систем ТРИС-2016» (г. Таганрог), X Международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ-2017» (г. Ростов-на-Дону), II Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ПТИ'17) (г. Варна, Болгария), Всероссийской национальной научно-

практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017») (г. Ростов-на-Дону), Международной научно-технической конференции «Автоматизация» (RusAutoCon-2018), (RusAutoCon-2022) (г. Сочи), III Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ИТИ'18) (г. Сочи), IV Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития» (г. Ростов-на-Дону), V Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: тренды и барьеры развития в условиях пространственно-технологических ограничений и неопределенности» (г. Ростов-на-Дону), VI Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ИТИ'22) (г. Стамбул, Турция), VII Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ИТИ'23) (г. Санкт-Петербург).

Результаты исследования были представлены в конкурсе «Молодые учёные транспортной отрасли-2017» (г. Москва), по итогам которого присуждено 1 место в номинации «Беспилотные технологии на транспорте».

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы используются в программно-аппаратных средствах позиционирования при строительстве систем диспетчерского управления Республики Сербия в рамках договора № 522 от 22.10.2024 г., исполняемого на базе ФГБОУ ВО РГУПС, а также в программном обеспечении Двухнаправленного интерфейсного преобразователя в составе распределенного контролируемого пункта (РКП ДИП), производимого ООО «ТСУ». Результаты были использованы при выполнении работ по гранту РФФИ 18-07-00126 А «Аналитическое адаптивное извлечение динамических знаний в нечетко-стохастических нелинейных средах на основе неперiodических точных измерений». Имеются акты внедрения.

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследования опубликованы в 46 научных работах общим объемом 41,44 п.л. (авторских – 11,28 п.л.), в том числе 11 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 18 статей в журналах наукометрических баз Web of Science и Scopus, глава в книге «Advances in Engineering Research».

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 133 наименований, списка сокращений и 2 приложений, включая 35 рисунков, 12 таблиц и 76 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и степень разработанности темы, определены цели и задачи, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы проведения исследований, приведены основные положения, достоверность и степень апробации результатов.

В первой главе рассмотрены современные интегрированные навигационные системы (НС), проведен анализ их применения на железнодорожном транспорте,

показаны особенности интеграции инерциальных и неинерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) в бесплатформенных навигационных системах ПЕ ЖДТ, проанализированы методы искусственного интеллекта, применяемые при построении интеллектуальных интегрированных навигационных систем, а также определены частные задачи исследования.

Проведенный краткий обзор современного состояния интегрированных НС и их ЧЭ показал, что, несмотря на непрерывное совершенствование технологий их изготовления, точность решения навигационных задач интегрированными НС не соответствует не только перспективным, но и сегодняшним требованиям к точности определения параметров движения ПЕ ЖДТ. В связи с этим первостепенное значение приобретает разработка интеллектуального алгоритма обеспечения интегрированных НС, позволяющего принципиально повысить точность определения навигационных параметров при уже существующей технологии их изготовления.

Анализ методов искусственного интеллекта, применяемых при построении интеллектуальных интегрированных НС, показал, что развитие искусственного интеллекта и, в частности, методов машинного обучения, поможет создать более точные и эффективные системы управления движением, уже сегодня использующие алгоритмы машинного обучения для анализа данных о движении поездов и прогнозирования задержек на станциях и перегонах.

Во второй главе получены обобщенная нелинейная и линеаризованная стохастические модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), комплексированной с неинерциальными измерителями в дискретной и непрерывной формах. Для построения уравнений полного навигационного вектора ПЕ ЖДТ была использована возможность комплексирования БИНС с одометрами, применение которых весьма характерно для навигационных систем ПЕ ЖДТ.

Представленные уравнения нелинейного движения ПЕ ЖДТ, а также полученные уравнения и соотношения позволили представить искомую систему уравнений навигационных параметров БИНС ПЕ ЖДТ, движущейся по локсодромии, в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{vmatrix} &= \Phi(\beta, \gamma)(Z_d - W_d); \\ \dot{\varphi} &= \frac{(Z_{\text{од}} - W_{\text{од}}) \cos \theta}{r + h}; \\ \dot{\lambda} &= \frac{(Z_{\text{од}} - W_{\text{од}}) \sin \theta}{\cos \varphi (r + h)}; \\ \dot{W}_{\text{од}} &= f(Z_{\text{од}}, W_{\text{од}}, t) + \chi, \end{aligned} \tag{1}$$

где α, β, γ – углы Эйлера – Крылова, определяющие ориентацию приборной системы координат (ПСК) относительно инерциальной системы координат; $\Phi(\beta, \gamma)$ – матрица углов Эйлера – Крылова; Z_d – вектор измерения трех ортогональных датчиков угловой скорости (ДУС), расположенных на ПЕ ЖДТ; W_d – аддитивный вектор помех измерения ДУС; λ – долгота объекта; φ – широта объекта; $Z_{\text{од}}$

– измерения одометра; $W_{\text{од}}$ – погрешность измерений одометра; r – радиус Земли; h – текущая высота объекта; $f(Z_{\text{од}}, W_{\text{од}}, t)$ – известная нелинейная функция; χ – белый гауссовский шум с нулевым матожиданием и интенсивностью D_χ .

В канонической форме Ланжевена стохастические уравнения исследуемой НС, полученные при самых общих предположениях о стохастическом характере помех измерительного комплекса ПЕ ЖДТ, можно представить как:

$$\dot{Y} = F(Y, t) + F_1(Y)\sigma, \quad (2)$$

где $Y = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \varphi \ \lambda \ W_{\text{од}}]^T$, $Y(0) = Y_0$, $\sigma = [W_d^T \ \chi]^T$.

Полученная модель (2) является полной стохастической моделью БИНС, инвариантной к физическому характеру объекта и характеру его движения, и будет использована при синтезе интегрированной навигационной системы в качестве базовой модели вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ.

Показана возможность упрощения полученной нелинейной модели движения ПЕ ЖДТ путем снижения нагрузки на бортовой вычислитель за счет использования линеаризованной модели движения, которая может быть представлена в векторной форме Ланжевена следующим выражением:

$$\dot{Y} = C_{\text{сис}} Y + C_{1\text{сис}} + C_{2\text{сис}} \sigma, \quad (3)$$

где Y – вектор навигационных параметров БИНС ПЕ ЖДТ; $C_{\text{сис}}$ – матрица нестационарных параметров системы; σ – вектор шумов измерений; $C_{1\text{сис}}$, $C_{2\text{сис}}$ – матрицы переходных состояний системы.

Математическая модель нелинейного стохастического наблюдателя параметров состояния БИНС, комплексированной с неинерциальными измерителями, в каноническом виде определяется как:

$$Z_a = H + H_1 \cdot \begin{vmatrix} \chi \\ W_a \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где H – матрица, определяемая матрицей поворота (текущей ориентации) сопровождающей системы координат относительно ПСК и матрицей проекций вектора ускорений, измеряемых акселерометрами; H_1 – матрица, зависящая от вектора помех акселерометров и от проекций параметров движения ПЕ ЖДТ, движущейся по локсодромии.

В свою очередь, уравнение линейного наблюдателя в общем (каноническом) виде может быть представлено следующим образом:

$$Z = H_{\text{лин}}(Y_0)Y_{\text{лин}} + W_a, \quad (5)$$

где $H_{\text{лин}}(Y_0)$ – функция, зависящая от начальных параметров движения ПЕ ЖДТ (или их текущих оценок); $Y_{\text{лин}}$ – вектор-функция текущих параметров ПЕ ЖДТ; W_a – вектор помех акселерометров.

Полученные обобщенные нелинейная и линеаризованная стохастические модели БИНС, а также уравнения линейного и нелинейного наблюдателей легко могут быть представлены в дискретной форме и позволяют в дальнейшем построить дискретный фильтр Калмана.

В третьей главе рассмотрены общие принципы построения алгоритмов стохастической фильтрации параметров движения бесплатформенной НС (БНС),

сформированы уравнения расширенного (обобщенного) фильтра Калмана для рассматриваемой БНС, проведен анализ методов машинного обучения, используемых при синтезе систем управления и навигации интеллектуальных транспортных систем, представлен интеллектуальный алгоритм принятия решений по высокоточной оценке параметров движения ПЕ ЖДТ.

Проведенный анализ общих принципов построения систем управления и навигации интеллектуальных транспортных систем показал актуальность использования алгоритмов машинного обучения, в частности, адаптивной калмановской фильтрации, в задачах высокоточного позиционирования железнодорожных транспортных средств.

При построении различных комплексированных измерительных систем необходима коррекция первичных измерений датчиков, погрешности которых растут со временем. Для этого предложено использование точных спутниковых измерений, поступающих в некоторые произвольные моменты времени, а также проведение обучения (адаптации) самого алгоритма оценивания, позволяющего существенно повысить точность оценивания параметров состояния объекта.

Оценка вектора состояния нелинейной системы $\hat{Y}_k$ в k -й момент времени определяется как:

$$\hat{Y}_k = F(\hat{Y}_{k-1}, k-1) + K_k (Z_{a_k} - H_k [F(\hat{Y}_{k-1}, k-1)]), \quad (6)$$

где $\hat{Y}_k$ – оценка вектора состояния системы в k -й момент времени, $\hat{Y}_k = [\hat{\alpha}_k \ \hat{\beta}_k \ \hat{\gamma}_k \ \hat{\lambda}_k \ \hat{\phi}_k \ \hat{W}_{од_k}]^T$; $F(Y_{k-1})$ – векторная нелинейная функция системы; $F(\hat{Y}_{k-1}, k-1)$ – экстраполированная оценка вектора состояния; K_k – матричный коэффициент усиления фильтра; Z_{a_k} – вектор выходных сигналов акселерометров, расположенных на ПЕ ЖДТ, на текущем шаге измерения; $H_k(Y_k)$ – вектор-функция наблюдения параметров состояния; $H_k[F(\hat{Y}_{k-1}, k-1)]$ – экстраполированная оценка вектора наблюдений.

Так как формулируемая задача является задачей обучения (адаптации) алгоритма оценки, далее использован адаптивный вариант фильтра Калмана, в котором коэффициент усиления определяется как:

$$K_k = P_{k/k-1} \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_{k/k-1} \cdot H_k^T + D_{S_k})^{-1} \quad (7)$$

$$P_{k/k-1} = \mu_k \cdot F_k \cdot P_{k-1} \cdot F_k^T + D_{\xi_k} \quad (8)$$

$$P_k = (E - K_k \cdot H_{\text{линей}}) \cdot P_{k/k-1}$$

где H_k – матрица измерений, отображающая пространство векторов состояния системы в пространство векторов измерений; F_k – переходная матрица состояния системы; $P_{k/k-1}$ – экстраполированная ковариационная матрица; D_{S_k} – дисперсионная матрица интенсивностей шума измерений; μ_k – диагональная матрица коэффициентов адаптации фильтра; P_k – ковариационная матрица в k -й момент времени; D_{ξ_k} – дисперсионная матрица шума системы; E – единичная матрица.

Исходя из представленной формы коэффициента усиления фильтра, задача его обучения по точным измерениям сформулирована как задача нахождения матрицы μ_k из условия совпадения в соответствующий момент времени вектора оценок $\hat{Y}_k$ (6) с точным вектором состояния системы Y_k (точными измерениями, в рассматриваемом случае – спутниковыми).

Произведя соответствующие подстановки и математические преобразования и введя обозначения: $F_k \cdot P_{k-1} \cdot F_k^T \cdot H_k^T \cdot D_{S_k}^{-1} = \Delta_{k,k-1}$ и $D_{\xi_k} \cdot H_k^T \cdot D_{S_k}^{-1} = U_k$, а также далее обозначив $\Delta_{k,k-1} \cdot (Z_* - H_k \cdot Y_*) = \Delta_*$, $U_k \cdot (Z_* - H_k \cdot Y_*) = U_*$, получим выражение для оценки вектора состояния системы:

$$Y_* - U_* = \mu_k \cdot \Delta_* \quad (9)$$

Уравнение (9) легко допускает аналитическое решение относительно всех элементов диагональной матрицы μ_k , если учесть возможность представления

произведения $\mu_k \cdot \Delta_*$ в виде $\Delta_{*diag} \mu_{k \text{ vect}}$, где $\Delta_{*diag} = \begin{vmatrix} \Delta_{*1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta_{*2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta_{*n} \end{vmatrix}$, $\mu_{k \text{ vect}} = \begin{vmatrix} \mu_{k1} \\ \mu_{k2} \\ \dots \\ \mu_{kn} \end{vmatrix}$,

$\Delta_{*i}, \mu_{ki}, i = 1, \dots, n$ – элементы, соответственно, вектора Δ_* и матрицы μ_k .

В этом случае имеем искомое выражение вектора элементов коэффициента адаптации в виде:

$$\Delta_{*diag}^{-1} (Y_* - U_*) = \mu_{k \text{ vect}}, \quad (10)$$

где Δ_{*diag}^{-1} – обратная матрица, легко вычисляемая аналитически в силу ее диагональности.

Таким образом, найденное решение векторного уравнения (6) в виде (10) позволяет аналитически решить поставленную задачу адаптации калмановского алгоритма оценки по точным измерениям.

В данной главе диссертационного исследования также представлены аналогичные решения поставленных задач для линейного движения объекта.

Оценка вектора состояния линейной системы $\hat{Y}_k$ в k -й момент времени определяется как:

$$\hat{Y}_k = C_{\text{сис}_{k-1}} \hat{Y}_{k-1} + C_{1\text{сис}_{k-1}} + K_k \left[Z_k - H_{\text{лин}_k} (C_{\text{сис}_{k-1}} \hat{Y}_{k-1} + C_{1\text{сис}_{k-1}}) \right], \quad (11)$$

где $\hat{Y}_k$ – оценка вектора состояния системы в k -й момент времени; $C_{\text{сис}_k}$ – переходная матрица состояния системы; $C_{1\text{сис}}, C_{2\text{сис}}$ – матрицы переходных состояний системы; K_k – матричный коэффициент усиления фильтра; Z_k – вектор наблюдений на текущем шаге измерения; $H_{\text{лин}_k}$ – матрица измерений, отображающая пространство векторов состояния системы в пространство векторов измерений.

Вектор наблюдений в данном случае определяется по формуле:

$Z_k = H_{\text{лин}_k} \cdot Y_k + W_k$, где W_k – случайная центрированная гауссовская последовательность с дисперсионной матрицей D_{d_k} .

Коэффициент усиления определяется как:

$$K_k = P_{k/k-1} \cdot H_{\text{лин}_k}^T \cdot (H_{\text{лин}_k} \cdot P_{k/k-1} \cdot H_{\text{лин}_k}^T + D_{d_k})^{-1}; \quad (12)$$

$$P_{k/k-1} = \mu_k \cdot C_{\text{сис}_{k-1}} \cdot P_{k-1} \cdot C_{\text{сис}_{k-1}}^T + D_{\xi_{\text{лин}_k}}; \quad (13)$$

$$P_k = (E - K_k \cdot H_{\text{лин}_k}) \cdot P_{k/k-1},$$

где обозначения $P_{k/k-1}$, μ_k , P_k , E – раскрыты ранее; $D_{\xi_{\text{лин}_k}}$ – матрица интенсивностей шумов системы.

Искомое выражение вектора элементов коэффициента адаптации после всех математических преобразований, как и в случае нелинейной системы, имеет вид (10).

В четвертой главе было проведено моделирование полученных уравнений линейного и нелинейного движений объекта для иллюстрации корректности и эффективности работы предложенного подхода к синтезу алгоритмов фильтрации с обучением.

Результаты моделирования уравнений линейного и нелинейного движений ПЕ ЖДТ, а также результаты моделирования традиционных алгоритмов фильтрации при линейном и нелинейном движениях ПЕ ЖДТ показали, что ошибки векторов состояния ПЕ ЖДТ при нелинейной фильтрации по сравнению с линейной по углам Эйлера – Крылова уменьшились в 1,5–2 раза, а по широте и долготе – на 0,5–0,6 м. Анализ порядка величин полученных ошибок позволил сделать вывод о том, что они не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к навигационной точности систем управления ПЕ ЖДТ. Следовательно, использование как линеаризованных моделей, так и расширенного (нелинейного) фильтра Калмана при решении навигационной задачи ПЕ ЖДТ нецелесообразно.

Проведенное численное моделирование фильтрации с обучением при линейном и нелинейном движениях ПЕ ЖДТ, а также сравнительный анализ уровней ошибок фильтрации без коррекции точными спутниковыми измерениями с результатами фильтрации с обучением показали, что при линейном движении ошибки по углам Эйлера – Крылова уменьшились в 3 раза, ошибки по широте уменьшились в 4 раза, ошибки по долготе – в 4,5 раза, а при нелинейном движении ошибки по углам Эйлера – Крылова уменьшились в 9–10 раз, ошибки по широте уменьшились в 17 раз, ошибки по долготе – в 16 раз.

Результаты сравнительного анализа уровней ошибок оценивания, обеспечиваемых алгоритмами линейной и нелинейной фильтрации с обучением показали, что разница ошибок по углам Эйлера – Крылова составляет не более $8 \cdot 10^{-4}$ рад, ошибки по широте и долготе отличаются в среднем на $3,4 \cdot 10^{-7}$ рад, поэтому при решении навигационной задачи ПЕ ЖДТ предпочтительным явля-

ется именно нелинейная калмановская фильтрация с обучением. Некоторое увеличение вычислительных затрат (следствие применения корректировочных вычислений) не является затруднительным для современных бортовых вычислителей, а значительное увеличение точности определения навигационных параметров движения ПЕ ЖДТ подтверждает преимущества предложенного алгоритма нелинейной фильтрации с обучением по сравнению с традиционными решениями поставленной задачи.

Графики ошибок оценок параметров вектора состояния системы при использовании нелинейной фильтрации с обучением на временном интервале [200; 300 с] представлены на рисунках 1 и 2.

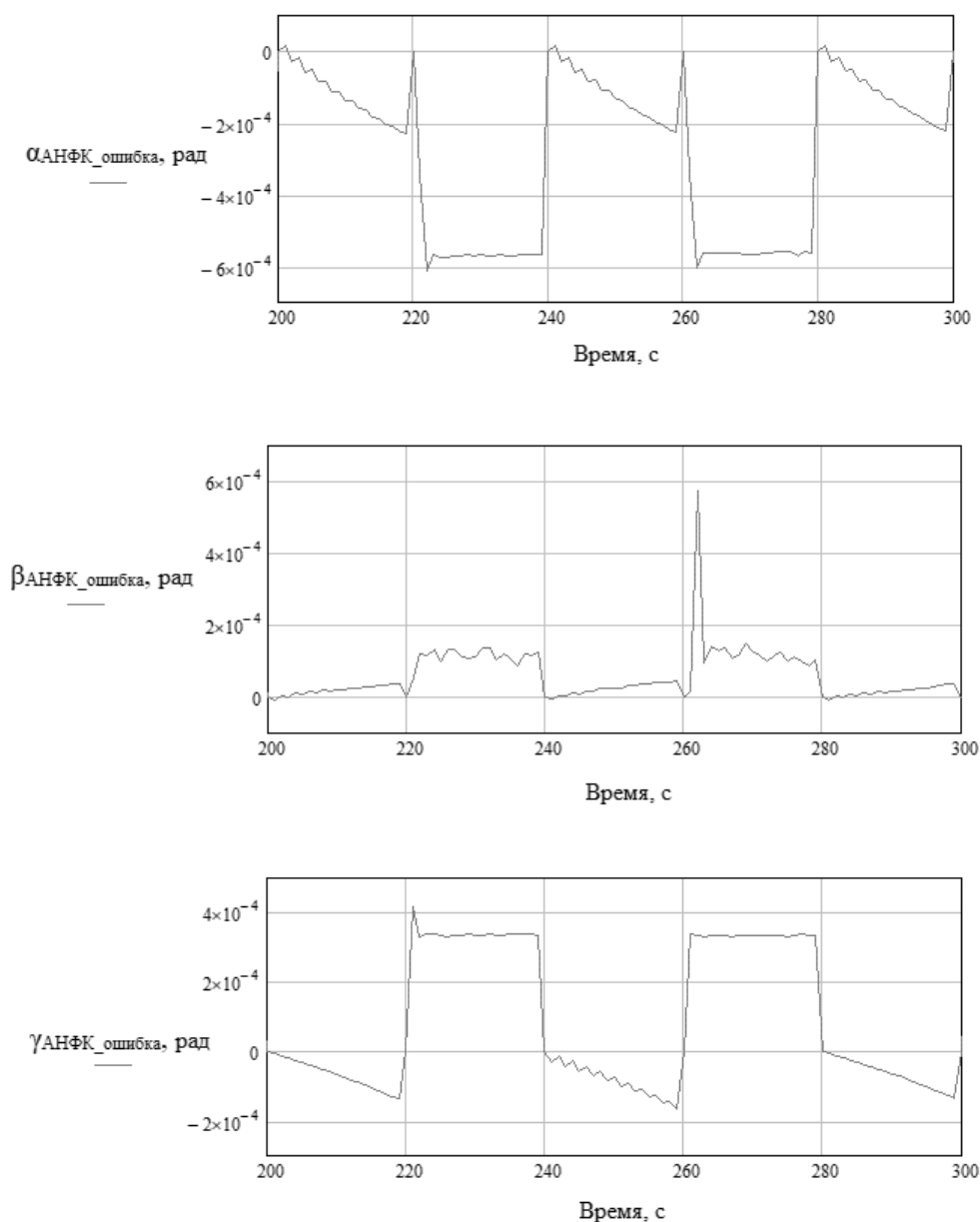
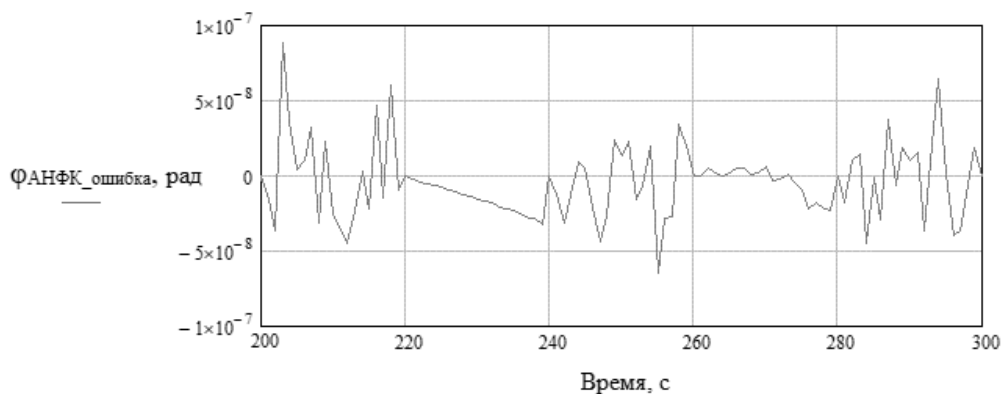
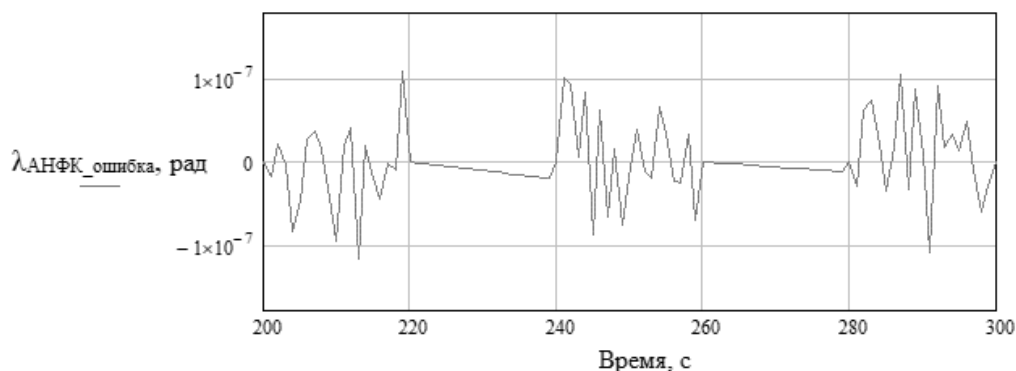


Рисунок 1 – Графики ошибок оценок параметров вектора состояния системы при использовании нелинейной фильтрации с обучением на промежутке с 200 по 300 с по углам Эйлера – Крылова



а)



б)

Рисунок 2 – Графики ошибок оценок параметров вектора состояния системы при использовании нелинейной фильтрации с обучением на промежутке с 200 по 300 с: а – по широте; б – по долготе

Полученные при моделировании результаты фильтрации с обучением подтвердили актуальность предложенного метода обучения алгоритма оценивания, т.к. показали существенное увеличение точности определения параметров движения ПЕ ЖДТ, соответствующее современным требованиям к точности подобных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ современных интеллектуальных интегрированных НС и особенностей интеграции инерциальных и неинерциальных ЧЭ в БНС ПЕ ЖДТ подтвердил актуальность применения таких систем на железнодорожном транспорте. В результате анализа методов искусственного интеллекта, применяемых при построении интеллектуальных интегрированных НС, определен возможный подход к решению поставленной задачи, а именно – использование методов машинного обучения навигационных алгоритмов для высокоточного определения навигационных параметров ПЕ ЖДТ. По итогам выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Получена полная нелинейная модель вектора состояния интегрированной НС, справедливая для произвольного временного интервала и характера движения ПЕ ЖДТ. Данная модель ориентирована на использование известных методов теории стохастической фильтрации, позволяющих получать теоретически строгие оптимальные оценки навигационных параметров.

2. Разработаны модели автономных наблюдателей вектора навигационных параметров ПЕ ЖДТ для режимов интеллектуальной интеграции НС, обеспечивающие возможность применения (в совокупности с полученной моделью вектора состояния интегрированной НС) существующих методов стохастической фильтрации.

3. На основе анализа применения полных (нелинейных) и упрощенных (линейных) моделей вектора состояния интегрированной НС и автономных наблюдателей навигационных параметров ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерения доказана эффективность их использования в интеллектуальных системах железнодорожного транспорта.

4. Аналитически решена задача построения дискретного линейного фильтра Калмана, обучаемого по непериодическим точным измерениям, для повышения точности оценки параметров движения ПЕ ЖДТ. Показана возможность обучения непосредственно самого алгоритма оценивания (коэффициента усиления фильтра и коэффициента адаптации фильтра) по полученным нерегулярным точным измерениям, что позволяет на временных интервалах между точными измерениями существенно повысить точность оценивания. Возможность нерегулярных точных измерений (в частности, спутниковых) позволяет в такте их появления точно определять параметры фильтра, обеспечивающие нулевую ошибку оценивания. Подобная перестройка параметров алгоритма оценивания резко увеличивает его сходимость.

5. Получено аналитическое решение задачи обучения алгоритма дискретной **нелинейной** фильтрации по нерегулярным точным измерениям, позволяющее существенно повысить точность оценивания параметров нелинейного вектора состояния НС на временных интервалах между точными измерениями.

6. Разработан интеллектуальный алгоритм принятия решения по высокоточной оценке параметров движения ПЕ ЖДТ на участках железнодорожного пути, необорудованных современными системами мониторинга и управления, обоснована актуальность его применения в интеллектуальных системах железнодорожного транспорта. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает высокоточное определение местоположения ПЕ ЖДТ в условиях интенсивных помех измерений.

7. Проведено численное моделирование алгоритмов традиционной фильтрации и фильтрации с обучением для линейной и нелинейной моделей НС ПЕ ЖДТ. Сравнительный анализ полученных результатов фильтрации с обучением и фильтрации традиционной показал, что при линейной фильтрации с обучением ошибки по углам Эйлера – Крылова по сравнению с традиционной фильтрацией уменьшились в 3 раза, ошибки по широте уменьшились в 4 раза, ошибки по долготе – в 4,5 раза; при нелинейном оценивании с обучением ошибки по углам Эйлера – Крылова по сравнению с традиционным фильтром уменьшились в

9–10 раз, ошибки по широте уменьшились в 17 раз, ошибки по долготе – в 16 раз. Такое уменьшение ошибок подтверждает преимущества предложенного метода фильтрации с обучением, а также позволяет сделать вывод о том, что полученные алгоритмы по точности удовлетворяют не только современным, но и перспективным требованиям, предъявляемым к точности систем управления ПЕ ЖДТ.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме. Разработанный интеллектуальный алгоритм стохастической оценки параметров движения ПЕ ЖДТ с обучением по непериодическим точным измерениям может быть эффективно использован в системах автоматического управления транспортными системами, в том числе беспилотными. В перспективе полученные решения возможно использовать в интегрированных навигационных и управляющих системах с применением других, постоянно совершенствуемых, интеллектуальных методов, обеспечивающих формирование полноценной интеллектуальной транспортной системы.

Основное содержание диссертационного исследования отражено в публикациях

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Полякова, М.В. Способы повышения точности адаптивного фильтра с использованием непериодических точных наблюдений / М.В. Полякова // I-methods. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 16–19.
2. Соколов, С.В. Адаптивный нелинейный фильтр Калмана на основе нерегулярных точных измерений / С.В. Соколов, М.В. Полякова // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. – № 11. – С. 10–17.
3. Полякова М.В. Применение адаптивного нелинейного фильтра Калмана на основе непериодических точных измерений в решении навигационной задачи подвижного объекта / М.В. Полякова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3. – С. 170–175.
4. Соколов, С.В. Аналитический синтез адаптивного фильтра Калмана на основе нерегулярных точных измерений / С.В. Соколов, М.В. Полякова, П.А. Кучеренко // Измерительная техника. – 2018. – № 3. – С. 19–23.
5. Адаптивная оценка дисперсионной матрицы шумов линейных измерений на основе непериодических точных наблюдений / С.В. Соколов, Е.Г. Чуб, М.В. Полякова, А.А. Манин // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т. 74. – № 6. – С. 264–268. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-6-264-268.
6. Соколов, С.В. Решение задачи интеграции инерциально-спутниковых навигационных систем с использованием аналитических траекторий / С.В. Соколов, А.В. Суханов, М.В. Полякова // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 8. – С. 3–14.
7. Структурная идентификация стохастических объектов в интеллектуальных динамических системах / П.А. Кучеренко, Л.Н. Стажарова, А.В. Костюков, О.И. Соколова, М.В. Куриненко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (87). DOI: 10.46973/0201-727X_2022_3_126.
8. Клепфиш Б.Р. Синтез стохастического оптимального управления на основе нелинейных вероятностных критериев / Б.Р. Клепфиш, С.В. Соколов, М.В. Полякова // Автоматика и вычислительная техника. – 2022. – Вып. 5. – С. 28–36.

9. Робастное позиционирование подвижных объектов на аналитических траекториях с использованием спутниковых навигационных измерений / С.В. Соколов, В.А. Погорелов, М.В. Полякова, К.Т. Ломтатидзе // Автометрия. – 2023. – Т. 59. – № 2. – С. 49–61. DOI: 10.15372/AUT20230206.

10. Метод комплексирования данных электронных карт и спутниковых измерений для высокоточного позиционирования подвижных объектов / С.В. Соколов, В.А. Погорелов, А.Л. Охотников, М.В. Куриненко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 4. – № 10. – С. 551–559. DOI: 10.17587/mau.24.551-559.

11. Стохастическая оценка параметров пространственной ориентации подвижных комплексов радиообнаружения и наведения летательных аппаратов / С.В. Соколов, Д.В. Маршаков, И.В. Решетникова, М.В. Куриненко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2025. – № 1. – С. 32–44.

*Статьи в журналах, входящих в наукометрические базы
Web of Science и Scopus:*

12. Guda, A. Application of acyclic precise measurements to the solution of the problem of adaptive nonlinear Kalman's filtration / A. Guda, M. Polyakova, S. Sokolov // International Russian Automation Conference, RusAutoCon, – 2018. – P. 16–19. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON. 2018.8501615.

13. Sokolov, S.V. Analytic synthesis of a Kalman adaptive filter on the basis of irregular precise measurements / S.V. Sokolov, M.V. Polyakova, P.A. Kucherenko // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 61. – Iss. 3. – P. 232–237. DOI: 10.1007/s11018-018-1414-5.

14. Polyakova, M.V. Use of irregular exact measurements in a problem of an adaptive filtration / M.V. Polyakova, A.A. Bayandurova, S.V. Sokolov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Т. 679. – P. 379–387. DOI: 10.1007/978-3-319-68321-8_39.

15. Polyakova, M.V. Adaptation of the nonlinear stochastic filter on the basis of irregular exact measurements / M.V. Polyakova, S.V. Sokolov, A.E. Kolodenkova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 85–91. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_10.

16. Kalman filter adaptation to disturbances of the observer's parameters / A.A. Manin, S.V. Sokolov, M.V. Polyakova [et. al.] // INVENTIONS. – 2021. – Vol. 6. – № 4. – № 80. DOI: 10.3390/inventions6040080.

17. Sokolov, S.V. Adaptive stochastic filtration based on the estimation of the covariance matrix of measurement noises using irregular accurate observations / S.V. Sokolov, A.I. Novikov, M.V. Polyakova // INVENTIONS. – 2021. – Vol. 6. – № 1. – № 10. DOI: 10.3390/inventions6010010.

18. Optical digital-to-analog converter for N-digit logic-based processing circuits / I.V. Reshetnikova, S.V. Sokolov, A.A. Manin, M.V. Polyakova, O.I. Sokolova // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Т. 2131. – № 2. – С. 022129. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022129.

19. Nonlinear stochastic filtration of satellite measurements / I.V. Reshetnikova, S.V. Sokolov, A.A. Manin, M.V. Polyakova, M.S. Gerasimenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Т. 2131. – № 2. – С. 022128. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022128.

20. Kalman filter adaptive to constant perturbations of the observable object parameters / A.A. Manin, A.V. Sukhanov, S.V. Sokolov, A.I. Novikov, M.V. Polyakova // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 330. – P. 527–538. LNNS. DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_52.

21. Sokolov, S.V. Nonlinear estimation of initial orientation parameters of navigation system on a movable base / S.V. Sokolov, V.A. Pogorelov, M.V. Polyakova // Advances in Engineering research. – 2022. – Vol. 50. – P. 189–206. ISBN 979-8-88697-283-2.

22. Klepfish, B.R. Synthesis of stochastic optimal control based on nonlinear probabilistic criteria / B.R. Klepfish, S.V. Sokolov, M.V. Polyakova // Automatic Control and Computer Sciences. – 2022. – Vol. 56. – Iss. 5. – P. 421–427. DOI: 10.3103/S0146411622050066.

23. Sokolov, S.V. High-precision navigation on analytical trajectories using strapdown inertial-satellite navigation system / S.V. Sokolov, A.V. Sukhanov, M.V. Polyakova // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022. –

24. P. 210–216. – № 22089781. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896308.

25. Terminal stochastic filtering of nonlinear dynamic processes: the case of invariant immersion / S.V. Sokolov, A.E. Khatlamadzhiyan, A.I. Novikov, M.V. Polyakova, D.N. Demidov // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. Conference proceedings. – 2023. – P. 369–379.

26. Robust positioning of moving objects on analytical trajectories using satellite navigation measurements / S.V. Sokolov, V.A. Pogorelov, M.V. Polyakova, K.T. Lomtadze // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing [this link is disabled](#). – 2023. – Vol. 59 (2). – P. 207–217. DOI: 10.3103/s8756699023020139.

27. Robust nonlinear filtering of navigation satellite measurements / S.V. Sokolov, V.A. Pogorelov, A.V. Sukhanov, M.V. Kurinenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2023. – Vol. 82. – Iss. 2. – Pp. 1–15. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.2022045789.

28. Sokolov, S.V. Robust filtering of nonlinear stochastic processes in machine learning systems / S.V. Sokolov, M.V. Kurinenko, O.I. Sokolova // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23), 2023. – Vol 777. – Pp. 217–224. DOI: 10.1007/978-3-031-43792-2_21.

29. Sokolov, S.V. Solution of the problem of terminal nonlinear filtering of stochastic processes / S.V. Sokolov, M.V. Kurinenko // Advanced Signal Processing for Industry 4.0. – 2023. – Vol. 2. – P. 7-1–7-15.

30. Stochastic estimation of spatial orientation parameters of mobile complexes of aircraft radio detection and guidance / S.V. Sokolov, D.V. Marshakov, I.V. Reshetnikova, M.V. Kurinenko // Russian Aeronautics. – 2025. – Vol. 68. – № 1. – P. 35–49. DOI: 10.3103/S1068799825010052.

Другие публикации:

31. Полякова М.В. Сравнительный анализ возможностей использования датчиков угловой скорости на различных физических принципах в навигационной системе локомотива / М.В. Полякова // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». Ч. 2. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015. – С. 109–111.

32. Полякова М.В. Использование дальномеров в интегрированных навигационных системах / М.В. Полякова // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России». Ч.1. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015. – С. 113–114.

33. Лященко, А.М. Применение МЭМС-датчиков в современных навигационных системах / А.М. Лященко, Н.Р. Осипова, М.В. Полякова // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т.1. – Ростов н/Д: РГУПС. 2016. – С. 174–176.

34. Полякова М.В. Модели ошибок акселерометров и гироскопов / М.В. Полякова // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т. 1, 2016. – С. 216–219.

35. Полякова, М.В. Повышение точности адаптивной фильтрации на основе использования непериодических точных наблюдений / М.В. Полякова, О.И. Соколова // Технологии разработки информационных систем ТРИС, 2016. С. 61–64.

36. Соколов, С.В. Решение проблемы адаптивной фильтрации на основе нерегулярных точных наблюдений / С.В. Соколов, М.В. Полякова, О.И. Соколова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. По результатам X Международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ-2017», Ростов н/Д: СКФ МТУСИ, 2017. – С. 432–437.

37. Копылова, Т.Ф. Сравнительный анализ характеристик спутниковых навигационных систем, используемых при позиционировании в локомотивах ОАО «РЖД» / Т.Ф. Копылова, М.В. Полякова // Труды РГУПС. – 2017. – № 2. – С. 31–34.

38. Решетникова, К.А. О возможности решения задачи адаптивной фильтрации на основе непериодических точных измерений / К.А. Решетникова, М.В. Полякова, О.И. Соколова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2018. – № 1. – С. 277–280.

39. Полякова, М.В. Общее решение задачи адаптивной Калмановской фильтрации для транспортных информационных систем, использующих нерегулярные точные наблюдения / М.В. Полякова, О.И. Соколова // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т.1. – Ростов н/Д: РГУПС, 2019. – С. 205–209.

40. Оценка дисперсионной матрицы шумов дискретных измерений с использованием нерегулярных точных наблюдений / А.А. Манин, М.В. Полякова, Е.Г. Чуб, О.И. Соколова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. Ч. I, 2019. – С. 5–13.

41. Феденко, Т.Ф. Решение навигационной задачи летательного аппарата на основе использования интегрированной навигационной системы и алгоритмов адаптивной нелинейной фильтрации / Т.Ф. Феденко, М.В. Полякова, Е.И. Кучкова // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные аспекты развития воздушного транспорта», приуроченной к 50-летию Ростовского филиала МГТУ ГА (АВИАТРАНС-2019), 2019. – С. 246–251.

42. Полякова, М.В. Применение адаптивного фильтра Калмана на основе нерегулярных точных наблюдений в управлении железнодорожным транспортом / М.В. Полякова, О.И. Соколова, Л.Н. Стажарова // Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития, 2020. – С. 255–258.

43. Полякова, М.В. Помехоустойчивое позиционирование локомотивов на основе адаптивного фильтра Калмана / М.В. Полякова, О.И. Соколова, Л.Н. Стажарова // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 1. Технические науки, 2020. – С. 134–138.

44. Манин, А.А. Алгоритм адаптации дискретного фильтра Калмана к неопределенности параметров наблюдаемого объекта / А.А. Манин, С.В. Соколов, М.В. Полякова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2020. – С. 19–26.

45. Манин, А.А. Фильтр Калмана, адаптивный к возмущениям параметров наблюдателя / А.А. Манин, С.В. Соколов, М.В. Полякова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2020. – С. 11–19.

46. Манин, А.А. Решение задачи устойчивой калмановской фильтрации при неопределенных возмущениях параметров наблюдателя / А.А. Манин, М.В. Полякова, С.В. Гладышук // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2020. – Т. 7. – № 1. – С. 33–41.

47. Охотников, А.Л. Оценка навигационных параметров локомотива на основе адаптивного фильтра Калмана / А.Л. Охотников, С.В. Соколов, М.В. Полякова // Труды НИИАС. – 2020. – Выпуск 11. – Т. 2. – С. 199–206.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [1, 3, 30, 31, 33] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [2, 4, 6, 8, 12–16, 22, 27, 28, 32, 34–38, 41–43, 46] – разработка моделей и алгоритмов, проведение компьютерного моделирования и обобщение полученных результатов; [9, 10, 39, 40, 44, 45] – анализ публикаций по теме исследования, проведение компьютерного моделирования; [17, 19, 21, 23, 25, 26] – анализ публикаций по теме исследования, разработка алгоритмов, проведение компьютерного моделирования, перевод на английский язык; [5, 7, 11, 18, 20, 24, 29] – анализ публикаций по теме исследования, численная реализация разработанных алгоритмов, набор материала.

Куриненко Марианна Витальевна

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА С
ОБУЧЕНИЕМ АЛГОРИТМА СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИ-
ЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ПО НЕПЕРИОДИЧЕСКИМ ТОЧНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.10.2025. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2