

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Селезневой Марии Сергеевны

на диссертацию **Горо Секу** «Разработка алгоритмов повышения точности бортовых измерений в целях идентификации параметров моделей движения самолетов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.5.16.** – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертационная работа **Горо Секу** посвящена решению актуальной задачи повышения точности бортовых измерений в целях параметрической идентификации моделей движения самолетов. Научное исследование направлено на разработку комплекса методов и алгоритмов, включающего оценивание и коррекцию систематических погрешностей, адаптивную обработку бортовых измерений, интеграцию нейронных сетей с алгоритмами комплексирования информации, а также совершенствование методов численного дифференцирования. Методологическую основу исследования составляют теория идентификации систем, алгоритмы комплексирования измерений, нейросетевые технологии и методы сплайн-аппроксимации.

Актуальность темы исследования. Повышение точности бортовых измерений параметров движения летательных аппаратов (ЛА) является одной из ключевых задач, решение которой необходимо для обеспечения достоверности параметрической идентификации математических моделей движения самолетов на всех этапах их жизненного цикла – от проектирования и испытаний до эксплуатации. Современное состояние методов идентификации, несмотря на высокую степень разработанности, в значительной степени зависит от точности используемых бортовых измерений. В связи с этим восстановление параметров полёта, компенсация возникающих погрешностей и разработка новых методов повышения точности оценивания параметров полёта приобретают ключевое значение для параметрической идентификации моделей движения самолетов. Особую актуальность данная проблематика имеет для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), где минимизация числа датчиков при сохранении высокой точности измерений является критически важной задачей в условиях жестких ограничений по массе и энергопотреблению.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки новых эффективных методов и алгоритмов, направленных на

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«8» 12 2025г.

преодоление таких выявленных проблем, как накопление ошибок в классических фильтрах Калмана, влияние систематических погрешностей на точность параметрической идентификации и потеря эффективности численного дифференцирования в условиях зашумленных данных. Перспективным направлением в этой области является комплексное применение теории идентификации систем, алгоритмов комплексирования измерений и восстановления сигналов, а также методов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей.

В представленной диссертационной работе рассматриваются актуальные задачи разработки алгоритмов обработки бортовых измерений, направленных на повышение точности параметрической идентификации модели движения ЛА за счет оценивания и коррекции систематических погрешностей, использования усовершенствованных методов фильтрации и адаптивного выбора параметров обработки данных. Решение этих задач базируется на применении методов оптимизации, математического и полунатурного моделирования, что вносит существенный вклад в развитие методов динамики полета и идентификации систем.

Содержания диссертации. Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень ее разработанности. Сформулированы цель, объект, предмет и задачи исследования. Изложены методы и подходы, использованные для достижения поставленной цели, представлены основные результаты, выносимые на защиту, а также положения, составляющие научную новизну и практическую значимость работы. Приведены сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов, данные об апробации работы и её структуре.

В первой главе диссертации рассмотрены системы бортовых измерений современных и перспективных ЛА, выявлены их недостатки и достоинства. Автором на основе анализа современных публикаций выполнен обзор методов обработки бортовых измерений, направленных на повышение их точности. Особое внимание уделено методам, основанным на комплексировании информации от разнородных датчиков, и методам теории идентификации систем, применяемым для оценивания погрешностей и параметров.

По результатам проведенного анализа автор сделал вывод, что перспективным направлением исследований является не только оценивание и коррекция погрешностей, но и ещё повышение точности оценок параметров и состояния системы. Достижение этой цели возможно за счёт использования современных инструментов таких как метод скользящего окна, нейросетевые технологии и сплайны Эрмита.

Во второй главе, являющейся центральной в работе, изложены методы и алгоритмы решения основных задач диссертации. В главе представлены: метод оценивания систематических погрешностей угловых скоростей, перегрузок и углов ориентации, основанный на совместной обработке данных датчиков и СНС; двухэтапный адаптивный алгоритм коррекции погрешностей дискретизации бортовых измерений, сочетающий детектирование особенностей сигнала и адаптивную сплайн-аппроксимацию; сравнительный анализ вариантов фильтра Калмана (расширенного и взвешенного), на основе которого для последующих задач выбран расширенный фильтр Калмана-Extended Kalman Filter (EKF); алгоритм идентификации аэродинамических параметров на основе расширенного фильтра Калмана с перекрывающимся скользящим окном (SW-EKF); а также разработанный метод численного дифференцирования для оценки углового ускорения, основанный на комплексировании измерений угла тангажа и угловой скорости тангажа.

В третьей главе предложен и исследован подход к определению оптимальной длительности скользящего окна в задаче идентификации параметров движения ЛА с использованием нейронных сетей. Продемонстрирована возможность применения машинного обучения для анализа истории измерений и автоматического выбора размера окна, обеспечивающего минимальную погрешность оценок аэродинамических параметров.

В четвертой главе собраны и систематизированы результаты экспериментальных исследований и численного моделирования. Для оценки работоспособности и эффективности разработанных в диссертации алгоритмов и методов было выполнено моделирование полетов гипотетического учебно-тренировочного самолета на пилотажном исследовательском стенде. При моделировании оператор воспроизводил различные виды полетных маневров.

В заключении обобщены и изложены основные результаты диссертационной работы.

Новизна полученных результатов и их научная ценность. В работе получены следующие результаты, обладающие новизной и научной значимостью:

- метод оценивания систематических погрешностей параметров полёта, основанный на сочетании бортовых измерений, выполненных на заданных режимах полёта, уравнений динамики полёта и параметрической идентификации;
- алгоритм, обеспечивающий коррекцию погрешностей дискретизации, вызванных ограниченной разрядностью сетки;

- алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана с перекрывающимся скользящим окном, обеспечивающий повышенную точность совместной оценки состояния и аэродинамических параметров модели движения самолёта в реальном времени;
- методика применения нейронных сетей для определения наилучшего скользящего интервала, обеспечивающего повышенную точность оценки аэродинамических параметров самолёта;
- метод численного дифференцирования на основе использования угла тангажа и угловой скорости, заданных в условиях шумов, позволяющий уменьшить погрешность оценки углового ускорения.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные в работе методы и алгоритмы могут быть использованы в ходе создания алгоритмического обеспечения для сопровождения испытаний и эксплуатации летательных аппаратов, а также в учебном процессе. Полученные результаты, обеспечивающие высокую точность бортовых измерений и оценивание параметров полета, представляют практическую ценность для совершенствования методов обработки полетной информации и могут найти применение при проектировании современных систем управления полетом.

Достоверность и обоснованность подтверждается путём проведения численного эксперимента, то есть реализации предложенных алгоритмов в виде программы для ЭВМ и обработки по этим алгоритмам экспериментальных данных, полученных путем стендового моделирования, сравнением оценок идентификации с известными значениями, принятыми для моделирования, а также сравнением с известными результатами, опубликованными в отечественных и зарубежных источниках.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 печатных работ, 4 статьи из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 1 статья в материалах и трудах конференций, индексируемых в базе данных Scopus. Кроме того, автор опубликовал 6 материалов в международных и всероссийских научно-технических конференциях.

В качестве замечаний по диссертации следует указать:

1. В первой главе в обзор бортовых систем значительная часть материала является избыточной с точки зрения обоснования задач диссертации, и больше соответствует обзорной лекции по бортовому радиоэлектронному оборудованию.
2. При сравнении двух вариантов калмановской фильтрации недостаточно полно представлена процедура определения начальных

значений ковариационной матрицы вектора состояния, что может существенно влиять на результаты фильтрации.

3. При изложении алгоритма, компенсирующего погрешности дискретизации, следовало бы более четко указать, что существует простое альтернативное аппаратное решение – увеличение разрядности аналого-цифрового преобразователя.
4. Предложенный автором алгоритм численного дифференцирования, строго говоря, выходит за рамки собственно теории численного дифференцирования, потому что автор использует не только дифференцируемый сигнал, но и другие сигналы, связанные с исходным через модель объекта. Это означает, что автор привлекает дополнительную информацию, содержащуюся в модели объекта, но тем самым ограничивает универсальность своего алгоритма.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью.

Общее заключение о диссертации. Диссертационная работа соискателя Горо Секу представляет собой законченное научное исследование, в котором решена актуальная задача разработки алгоритмов повышения точности бортовых измерений в целях параметрической идентификации моделей движения самолетов. Предложенные методы и алгоритмы, основанные на современном аппарате идентификации систем, комплексирования информации и нейросетевых технологий, вносят существенный вклад в развитие методов обработки полетной информации.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертации и содержит основные научные положения и технические решения, выносимые на защиту.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Горо Секу, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.5.16.** – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент:

Селезнева Мария Сергеевна – доктор технических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», доцент, профессор кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Тел. 8(495) 771-66-09

Элек. почта: m.s.selezneva@mail.ru

« 05 » декабря 2025



М.С. Селезнева

Подпись официального оппонента Селезнева М.С., д.т.н, доцента, профессора кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана «заверяю».



ВЕРНО: 
ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
И АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
НАЗНАЧЕН
8-499-283-68-02

С отзывом ознакомлен
08.12.2025  Горо секы