

На правах рукописи

Ху Цяоцу

**АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Специальность 2.3.1 –
Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Handwritten:
07.06.2023.
[Signature]

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Неусыпин Константин Авенирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления

Официальные оппоненты:

Корсун Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, Руководитель Научно-образовательного центра ФАУ федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Преснова Анна Павловна, кандидат наук по прикладной математике, доцент Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии»

Защита состоится «26» сентября 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» июня 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Для мониторинга подстилающей поверхности земли, в городских условиях в интересах МЧС и пожарной охраны, а также ряда других задач используются беспилотные летательные аппараты (БЛА) малого класса. К малому классу относятся БЛА российской компании ZALA, китайской компании DJI и др. Навигационные комплексы (НК) БЛА должны обладать высокой точностью определения навигационных параметров для эффективного функционирования специализированной измерительной аппаратуры.

Современные НК БЛА исследуемого класса состоят из инерциальной навигационной системы (ИНС), приемника GPS-сигналов и спецвычислителя, в котором реализуются алгоритмы обработки информации ИНС и GPS, а также управления БЛА. На малых БЛА устанавливают спецвычислители (микроконтроллеры) версии STM32 (ARM Cortex-M). Разработанный в Нанкинском университете науки и технологий БЛА FH-80 снабжен НК ИНС/GPS NC-30. НК имеет погрешности связанные с незащищенностью радиоканала и применением ИНС низкого класса точности. В условиях активных и пассивных помех сигнал GPS становится сопоставим по точности с ИНС. При эксплуатации БЛА в условиях города возникают погрешности НК, обусловленные отраженными от строений сигналами GPS и пассивными помехами работающей аппаратуры, ошибками ИНС, которые вызваны нестабильностью MEMS-элементов.

Повышение точности имеющегося НК необходимо проводить алгоритмическим путем. Обычно алгоритмическое обеспечение НК включают линейный фильтр Калмана (ФК) или его адаптивные модификации, проводящий оценивание погрешностей ИНС и последующую компенсацию в выходном сигнале системы. Используемая в фильтре Калмана модель определяет связи погрешностей ИНС.

Бесплатформенные ИНС (БИНС), выполненные на базе MEMS-элементов, отличаются экономичностью, но их погрешности носят явно выраженный нелинейный характер. Платформенные ИНС хорошо отработаны на практике, но имеют большую стоимость, габариты и массу.

Для повышения точности навигационных определений БЛА применяется совместная обработка нескольких НС, объединенных в навигационный комплекс (НК). Наиболее распространенная конфигурация НК малого БЛА состоит из ИНС, GPS и ФК. С помощью ФК осуществляется оценка погрешностей ИНС и последующая компенсация в выходном сигнале системы.

Коррекция НК с помощью ФК отличается относительной простотой реализации и невысокой точностью. Упрощение реализации алгоритмического обеспечения проводится с помощью скалярного подхода, который позволяет представить ФК в виде формул с переменными коэффициентами, что несколько снижает точность оценивания, но существенно упрощает процесс получения оценок погрешностей ИНС.

Высокоточная коррекция НК осуществляется при помощи нелинейного фильтра Калмана (НФК). В условиях маневрирования БЛА априорные нелинейные модели изменения погрешностей ИНС становятся неадекватными реальному процессу, поэтому применяют модификации НФК, которые проводятся при помощи нейронных сетей, генетических алгоритмов и алгоритмов самоорганизации.

Алгоритмы построения моделей позволяют построить модель исследуемого процесса с высокой точностью, но эти модели являются нефизичными, их структура заранее неизвестна и в процессе построения модели постоянно изменяется. Алгоритмы построения моделей требуют повышенной производительности бортового вычислителя, поэтому их использование в рассматриваемой задаче затруднительно.

Упрощение бортовой реализации алгоритмов оценивания достигается с помощью идентификации моделей оцениваемого процесса, например, применением метода наименьших квадратов (МНК), но при этом точность оценивания снижается по сравнению с упомянутыми модификациями НФК.

Таким образом, при маневрировании малых БЛА для сохранения адекватности модели погрешностей ИНС необходимо осуществлять параметрическую идентификацию модели. Для параметрической идентификации нелинейных моделей предложено использовать State Dependent Coefficient (SDC)-представление, позволяющее представить нелинейную модель в виде нелинейной модели с линейной структурой.

Алгоритмы идентификации позволяют определить отдельные параметры матрицы модели, структура которой задана априори.

Точность определения параметров модели зависит от свойств матрицы модели и точности алгоритма идентификации. Выбор используемого алгоритма идентификации определяется из соображений возможностей реализации в имеющемся вычислителе (спецвычислитель, БЦВМ).

Известны различные способы определения идентифицируемости, позволяющие определить принципиальную возможность осуществления процедуры идентификации. Критерии качества идентификации или степени идентифицируемости исследовали Балонин, Айвазян, Шэнь Кай, Пью Си Тху и др.

Для повышения точности измерительной информации, получаемой посредством ИНС и НК, применяются различные алгоритмы коррекции, которые реализуются в спецвычислителях или БЦВМ БЛА. Современный уровень вычислительной техники позволяет реализовать на борту БЛА сложные алгоритмы коррекции, включающие математические модели погрешностей используемых измерительных систем (обычно модели погрешностей измерительных систем). В практических приложениях некоторые параметры матриц этих моделей достоверно неизвестны, поэтому осуществляется их идентификация. Определение качества идентификации параметров модели позволяет осуществить выбор наиболее точных моделей, оценить точность коррекции измерительных систем, т.е. представляет собой важную и актуальную задачу.

Целью работы является разработка и исследование компактных алгоритмов параметрической идентификации и их использование в задаче коррекции НК малого БЛА.

Задачи, решаемые в диссертации. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Формирование компактных алгоритмов коррекции НК малого БЛА.
2. Исследование критериев степени идентифицируемости параметров нелинейных математических моделей;
3. Разработка критерия степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей динамических систем;
4. Исследование свойств моделей, используемых в алгоритмах коррекции НС и НК;
5. Реализация разработанных алгоритмов в задаче коррекции ИНС.

На защиту выносятся:

1. Компактная процедура идентификации (ПИ) с повышенными характеристиками идентифицируемости параметров SDC-моделей динамических объектов, основанная на скалярном представлении моделей.
2. Оригинальный численный критерий степени идентифицируемости параметров нелинейных SDC-моделей динамических систем, основанный на использовании свойств матрицы наблюдаемости.
3. Функциональная схема коррекции НК с НФК и процедурой идентификации, а также способ формирования математических моделей с высокими степенями идентифицируемости параметров.
4. Алгоритм коррекции НК малого БЛА с высокоточными математическими моделями и повышенными характеристиками параметрической идентифицируемости.

Научная новизна проведенных исследований и полученных решений заключается в результатах проведенного системного анализа подходов, способов и критериев определения степени идентифицируемости параметров математических моделей НК малых БЛА.

Разработана простая процедура параметрической идентификации с использованием моделей с повышенными характеристиками идентифицируемости. На основе проведенного анализа предложен оригинальный численный критерий степени идентифицируемости параметров нелинейных математических моделей, представленных посредством SDC-метода. Разработанный критерий отличается универсальностью, компактностью и простотой в использовании на практике.

Разработан способ формирования алгоритмов коррекции НК, позволяющий использовать математические модели погрешностей ИНС с высокими степенями идентифицируемости параметров.

Практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в разработке способов и алгоритмов повышения точности НК малого БЛА, основанных на применении моделей с высокими степенями идентифицируемости параметров, которые неизвестны или достоверно неизвестны.

Разработанный алгоритм коррекции с высокоточными математическими моделями позволяет повысить точность ИНС и НК малого БЛА.

Разработанный способ формирования математических моделей может быть использован в алгоритмах обработки информации ИНС различных классов, а также разнообразных систем управления динамических объектов.

Материалы диссертации использованы при реализации научных исследовательских проектов в Nanjing Huaman Institute of information technology, КНР и в учебном процессе факультета Информатики и систем управления кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность полученных в диссертации результатов и выводов обеспечивается достаточно глубокой теоретической проработкой известных подходов, использованием апробированных методов, корректностью математических выводов при разработке критерия идентифицируемости, а также согласованностью полученных результатов с данными полунатурного моделирования с реальными ИНС и с известными данными, опубликованными в открытой печати.

Для исследований применялись методы теории управления и теории случайных процессов, теории навигации, а также вычислительные методы, математическое и полунатурное моделирование, результаты летного эксперимента.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на международных конференциях: 2018 Global Smart Industry Conference (Челябинск, 2018 г.); X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2018 г.) и XII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2020 г.), на научном семинаре кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 научных статей в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ и 1 статья, индексируемая в базе Scopus, общим объемом 6,4 п.л./3,3 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, списка используемой литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 145 машинописных страницах, содержит 25 рисунков. Список литературы содержит 98 источников.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель, приведены задачи, решаемые в диссертации, научная новизна, положения, выносимые на защиту, практическая ценность, достоверность полученных результатов, а также апробация работы и ее структура.

В первой главе диссертации представлены НС и НК малых БЛА. Рассмотрены типы малых БЛА и особенности установленных на них НС. Исследованы погрешности НС и НК малых БЛА. Выделен конкретный тип малых БЛА, установленный на нем НК подлежит дальнейшему исследованию.

Современные НК БЛА исследуемого класса состоят из ИНС, приемника GPS-сигналов и спецвычислителя, в котором реализуются алгоритмы обработки информации ИНС и GPS, а также управления БЛА. На малых БЛА устанавливаются спецвычислители (микроконтроллеры) версии STM32 (ARM Cortex-M).

Разработанный в Нанкинском университете науки и технологий БЛА FH-80 «Пегас» снабжен НК ИНС/GPS NC-30. НК имеет погрешности, связанные с незащищенностью радиоканала и применением ИНС низкого класса точности. В условиях активных и пассивных помех сигнал GPS становится сопоставим по точности с ИНС. При эксплуатации БЛА в условиях города возникают погрешности НК, обусловленные отраженными от строений сигналами GPS и пассивными помехами работающей аппаратуры, ошибками ИНС, которые вызваны нестабильностью MEMS-элементов.

Использование более точных ИНС приводит к существенному удорожанию БЛА, поэтому повышение точности НК целесообразно проводить алгоритмическим путем. Используется алгоритмическое обеспечение НК исследуемого БЛА в двух вариантах: включает линейный фильтр Калмана (ФК) или нелинейный фильтр Калмана (НФК). С помощью ФК и НФК осуществляется оценивание погрешностей ИНС и последующая их компенсация в выходном сигнале НК. В ФК используется классическая линейная модель погрешностей ИНС и определение ковариационной матрицы входного шума с помощью обновляемой последовательности. Для более точного оценивания погрешностей ИНС применяется НФК. В НФК используется нелинейная модель погрешностей ИНС. Применение НФК сопряжено с повышенными вычислительными затратами, которые компенсируются за счет сокращения вычислительных ресурсов, отводимых в спецвычислителе под реализацию других алгоритмов.

В практических приложениях при маневрировании БЛА модели погрешностей ИНС становятся неадекватными реальным процессам. Поэтому в НК исследуемого БЛА применяются процедуры ПИ для линейных и нелинейных систем. ПИ нелинейных моделей осуществляется с применением SDC-представления.

Предложен способ повышения точности ПИ с использованием критериев степени параметрической идентифицируемости.

Рассмотрен БЛА, который использован в качестве носителя НК с исследуемыми алгоритмами.

НК БЛА FH-80 снабженным различными алгоритмами ФК и НФК. FH-80 – это БЛА вертикального взлета и посадки (Vertical Take-Off and Landing, VTOL), который может взлетать и садиться при нулевой горизонтальной скорости. БЛА FH-80 «Пегас» показан на Рис. 1.



Рис. 1. БЛА малого класса FH-80 «Пегас»

БЛА FH-80 применяется в городских условиях для контроля экологической ситуации, в работе пожарной службы и МЧС. В процессе эксплуатации БЛА осуществляет вертикальный взлет, перемещение по заранее заданному маршруту с постоянной скоростью до точки посадки, вертикальное снижение и посадку. Эффективность выполнения БЛА поставленных задач в большой степени зависит от точности НК. Погрешности ИНС обусловлены нестабильностью параметров. Сигналы GPS искажены помехами, погрешности ИНС с течением времени накапливаются, поэтому в НК осуществляется совместная обработка сигналов GPS и ИНС с помощью алгоритмов оценивания.

Обоснована развернутая постановка задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена исследованию компактных алгоритмов параметрической идентификации.

Математические модели, полученные на основе физических или каких-либо других законов, в практических приложениях, как правило, не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации и алгоритмы построения моделей. Алгоритмы параметрической идентификации позволяют определить отдельные параметры матрицы модели, структура модели задана априори. В качестве алгоритмов построения моделей часто используются наиболее точные алгоритмы: нейронные сети, методы самоорганизации и генетические алгоритмы. Алгоритмы построения моделей позволяют построить модель исследуемого процесса с высокой точностью, но эти модели являются нефизичными, их структура заранее неизвестна и в процессе построения модели постоянно изменяется. Алгоритмы построения моделей требуют повышенной производительности бортового вычислителя, поэтому их использование в рассматриваемой задаче затруднительно.

Для упрощения реализации алгоритмов параметрической идентификации применен известный скалярный подход. Представлен скалярный алгоритм параметрической идентификации, который использован в качестве базового

алгоритма для модернизации. Разработана процедура параметрической идентификации, отличающаяся простотой реализации.

НК БЛА FH-80 снабжен алгоритмическим обеспечением, позволяющим существенно повысить точность навигационных определений.

На Рис. 2 представлена схема НК с НФК и ПИ.

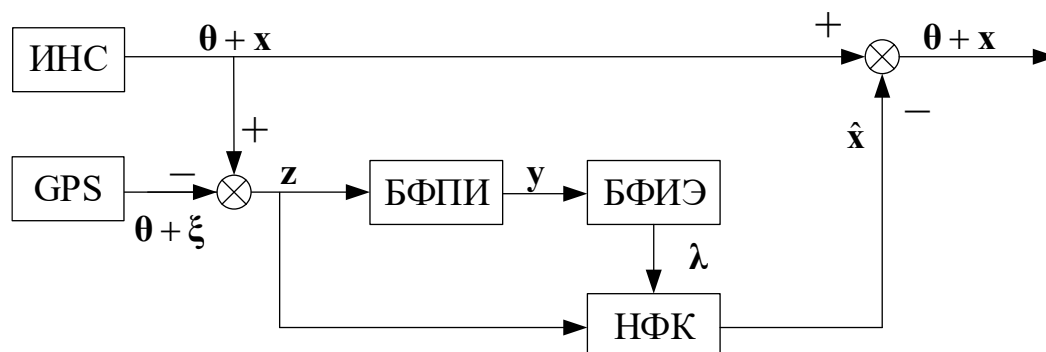


Рис. 2. Структурная схема НК с НФК и процедурой идентификации

Здесь БФПИ – блок формирование приведенных измерений; БФИЭ – блок формирования идентифицируемых элементов; θ – истинная навигационная информация; x – вектор погрешностей ИНС; ξ – вектор погрешностей GPS; z – вектор измерений; \hat{x} – оценка вектора погрешностей ИНС; λ – ошибки оценивания погрешностей ИНС.

Совокупность БФПИ и БФИЭ представляет собой ПИ. Представленное алгоритмическое обеспечение НК позволяет идентифицировать неизвестные коэффициенты модели погрешностей ИНС в полете малого БЛА. Модель с идентифицированными параметрами используется в НФК при оценке погрешностей ИНС.

Недостатком процедуры параметрической идентификации является низкая точность, в частности обусловленная влиянием измерительных шумов. Способы повышения точности параметрической идентификации представлены в **третьей главе** диссертации.

Рассмотрены наиболее популярные способы повышения точности идентификации. Одним из перспективных подходов при решении задачи повышения точности идентификации является использование моделей с повышенными характеристиками идентифицируемости.

Исследованы известные способы определения степени идентифицируемости.

В критерии степени идентифицируемости мерой качества идентификации является скаляр. Эта особенность выгодно отличает предложенный критерий от известных, так как позволяет проводить сравнение степеней идентифицируемости компонент векторов параметров матриц моделей различных процессов.

В случае использования для коррекции НК НФК используется SDC-представление нелинейной системы. Уравнения погрешностей ИНС и уравнение измерений имеют вид

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k + \mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{w}_k; \\ \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}.\end{aligned}\quad (1)$$

где \mathbf{x}_{k+1} – вектор состояния; \mathbf{w}_k – вектор входного возмущения; $\Phi(t_k, \mathbf{x}_k)$ – матрица объекта; $\mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k)$ – матрица входа; \mathbf{y}_{k+1} – вектор измерения; \mathbf{v}_{k+1} – вектор измерительного шума; $\mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})$ – матрица измерения.

Предполагается, что \mathbf{w}_k и \mathbf{v}_{k+1} являются гауссовскими «белыми» некоррелированными шумами, причём для любых j и k , \mathbf{v}_j и \mathbf{w}_k некоррелированы между собой (т.е. $M[\mathbf{v}_j \mathbf{w}_k^T] = 0$).

Выражение измерения \mathbf{y}_{k+1} для вектора состояния, используя n проведённых измерений, имеет вид

$$\mathbf{y}_k^* = \mathbf{O}_k^* \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k^*, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_k^* &= \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{y}_{k+n-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{O}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(t_k, \mathbf{x}_k) \\ \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \\ \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \\ \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \Phi(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2}) \mathbf{L} \quad \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \end{bmatrix}; \\ \mathbf{v}_k^* &= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k \\ \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1} \\ \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \\ \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \Phi(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2}) \mathbf{L} \quad \Phi(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{w}_k + \mathbf{L} \\ + \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1} \end{bmatrix};\end{aligned}$$

векторы \mathbf{y}_k^* , \mathbf{v}_k^* и матрица \mathbf{O}_k^* включают параметры, которые зависят от состояния.

Матрица \mathbf{O}_k^* в формуле (2) для нелинейных объектов является матрицей наблюдаемости.

Под степенью идентифицируемости понимается интервал времени за который можно идентифицировать параметр с заданной точностью и возможную достижимую точность определения параметра. Для вычисления степени идентифицируемости параметров нелинейной модели используют различные подходы линеаризации, в частности SDC-представление.

Пусть уравнение объекта в SDC-представление и уравнение измерений имеют вид (1). В этом случае вектор состояния \mathbf{x}_{k+n} можно выразить его значением в начальный момент времени \mathbf{x}_k в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+n} &= \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \quad \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k \\ &+ \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \quad \Phi(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{w}_k \\ &+ \mathbf{L} + \mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{w}_{k+n-1}.\end{aligned}\quad (3)$$

Подставив выражение (3) в уравнение измерений \mathbf{y}_{k+n} , получим

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_{k+n} = & \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k \\ & + \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{w}_k \\ & + \mathbf{L} + \mathbf{H}_{k+n} \mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}.\end{aligned}\quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) выражение \mathbf{x}_k , получим

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_{k+n} = & \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{O}_k^+ \mathbf{y}_k^* \\ & - \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{O}_k^+ \mathbf{v}_k^* \\ & + \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{w}_k \\ & + \mathbf{L} + \mathbf{H}_{k+n} \mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n},\end{aligned}\quad (5)$$

где $\mathbf{O}_k^+ = [\mathbf{O}_k^{*T} \mathbf{O}_k^*]^{-1} \mathbf{O}_k^{*T}$ – псевдообратная матрица \mathbf{O}_k^* .

Введём обозначения

$$[\lambda_{1,k} \quad \lambda_{2,k} \quad \mathbf{L} \quad \lambda_{n,k}] = \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{O}_k^+. \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_k^0 = & \gamma_{1,k} \mathbf{w}_k + \gamma_{2,k} \mathbf{w}_{k+1} + \mathbf{L} + \gamma_{n,k} \mathbf{w}_{k+n-1} \\ & - \lambda_{1,k} \mathbf{v}_k - \lambda_{2,k} \mathbf{v}_{k+1} - \mathbf{L} - \lambda_{n,k} \mathbf{v}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n} \\ = & \mathbf{H}_{k+n} \Phi(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{L} \Phi(t_k, \mathbf{x}_k) \mathbf{O}_k^+ \mathbf{v}_k^* \\ & + \mathbf{L} + \mathbf{H}_{k+n} \mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1}) \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}.\end{aligned}\quad (7)$$

Тогда постановка задачи сводится к определению неизвестных нестационарных элементов вектора-столбца $[\lambda_{1,k} \quad \lambda_{2,k} \quad \mathbf{L} \quad \lambda_{n,k}]$ по вновь сформированным измерениям, т.е.

$$\begin{aligned}\lambda_{1,k} = & f_{1,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) + v_k^{00}; \\ \lambda_{2,k} = & f_{2,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) + v_{k+1}^{00}; \\ & \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{L} \\ \lambda_{n,k} = & f_{n,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) + v_{k+n-1}^{00},\end{aligned}\quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} f_{1,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) \\ f_{2,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) \\ \mathbf{L} \\ f_{n,k}(y_k, \mathbf{L}, y_{k+2n-1}) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \mathbf{L} & y_{k+n-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \mathbf{L} & y_{k+n} \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ y_{k+n-1} & y_{k+n} & \mathbf{L} & y_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_{k+n} \\ y_{k+n+1} \\ \mathbf{L} \\ y_{k+2n-1} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} v_k^{00} \\ v_{k+1}^{00} \\ \mathbf{L} \\ v_{k+n-1}^{00} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \mathbf{L} & y_{k+n-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \mathbf{L} & y_{k+n} \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ y_{k+n-1} & y_{k+n} & \mathbf{L} & y_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_k^0 \\ v_{k+1}^0 \\ \mathbf{L} \\ v_{k+n-1}^0 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Для уменьшения приведенного измерительного шума в уравнении (8),

также как и в линейной постановке задачи, предлагается увеличить степень параметрической идентифицируемости исследуемого параметра. Критерий степени идентифицируемости параметров модели имеет вид:

$$J = \mathbf{O}_k^+ = \left[\mathbf{O}_k^{*T} \mathbf{O}_k^* \right]^{-1} \mathbf{O}_k^{*T} \rightarrow \min. \quad (9)$$

При использовании в ПИ критерий степени идентифицируемости имеет следующий вид:

$$J = \frac{1}{\left[\det \mathbf{O}_k^* \right]^2} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Критерий отличается простотой и удобен в практических приложениях.

Таким образом, в третьей главе разработаны ПИ с повышенными характеристиками параметрической идентифицируемости, критерий степени идентифицируемости и способ формирования алгоритма коррекции интегрируемой ИНС, основанный на использовании моделей с высокими степенями идентифицируемости параметров матрицы модели погрешностей ИНС.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмических решений.

SDC-представление нелинейной модели погрешностей ИНС имеет вид:

$$\mathbf{x}_k = \Phi(t_{k-1}, \mathbf{x}_{k-1}) \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (11)$$

где

$$\Phi(t_{k-1}, \mathbf{x}_{k-1}) \mathbf{x}_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & -gx_{3,k-1}T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & gx_{4,k-1}T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \frac{T}{R} \operatorname{tg} \varphi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,k-1} \\ x_{2,k-1} \\ x_{3,k-1} \\ x_{4,k-1} \\ x_{5,k-1} \\ x_{6,k-1} \\ x_{7,k-1} \\ x_{8,k-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \delta V_{E,k} \\ \delta V_{N,k} \\ \Phi_{E,k} \\ \Phi_{N,k} \\ \Phi_{H,k} \\ \varepsilon_{E,k} \\ \varepsilon_{N,k} \\ \varepsilon_{H,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ x_{3,k} \\ x_{4,k} \\ x_{5,k} \\ x_{6,k} \\ x_{7,k} \\ x_{8,k} \end{bmatrix}, \mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix} B_{E,k-1} \\ B_{N,k-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_{E,k-1} \\ w_{N,k-1} \\ w_{H,k-1} \end{bmatrix}.$$

$\delta V_E, \delta V_N$ – погрешности в определении скорости БЛА; Φ_E, Φ_N, Φ_H – углы

отклонения приборной системы координат относительно опорной системы координат; ε_E , ε_N , ε_H – скорости дрейфа гироскопов; φ – широта местоположения; w_E , w_N , w_H – возмущающие внешние воздействия; B_E , B_N – смещение нулей акселерометров; μ – средняя частота случайного изменения дрейфа гироскопов; R – радиус Земли; g – ускорения силы тяжести; T – период дискретизации.

Представлены результаты моделирования погрешностей интегрированной ИНС и их оценки.

Исследованы результаты идентификации априорно достоверно неизвестных параметров матрицы ошибок ИНС.

Использование критерия степени идентифицируемости позволяет выделить параметры матрицы модели, поддающиеся эффективной идентификации.

При идентификации параметров модели с низкими степенями идентифицируемости точность вычисления этого параметра оказывается невысокой и использование таких моделей для коррекции приводит к худшим результатам.

Исследован процесс идентификации g с помощью скалярного алгоритма идентификации с различными моделями погрешностей ИНС. Результаты моделирования представлены на Рис. 3.

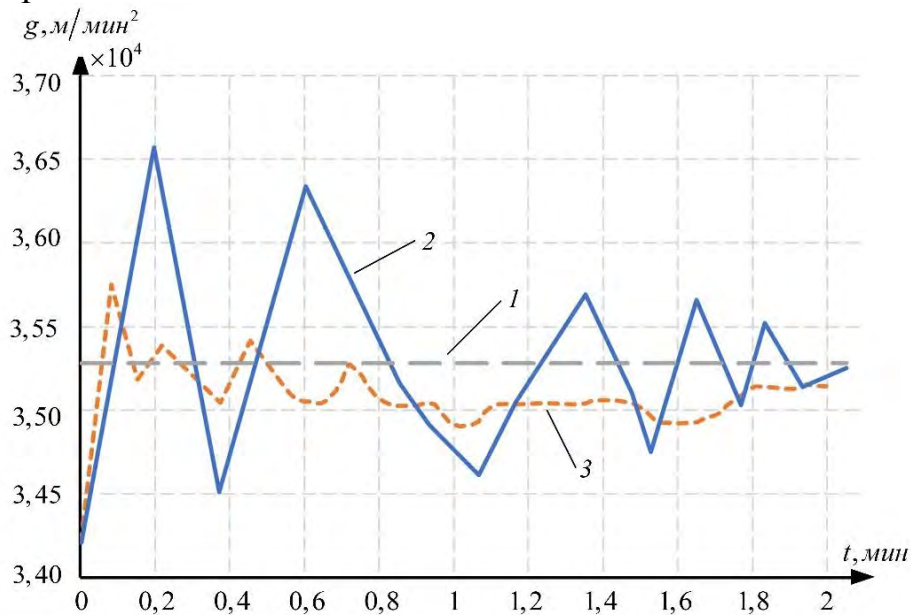


Рис.3. Идентификация параметра g с помощью скалярного алгоритма идентификации и ПИ.

На Рис. 3 введены следующие обозначения: 1 – параметр g ; 2 – оценка параметра с помощью скалярного алгоритма идентификации с моделью одного горизонтального канала погрешностей ИНС; 3 – оценка с помощью алгоритма идентификации с моделью трех каналов погрешностей ИНС.

На Рис. 4 представлены результаты обработки данных лабораторного эксперимента с ИНС.

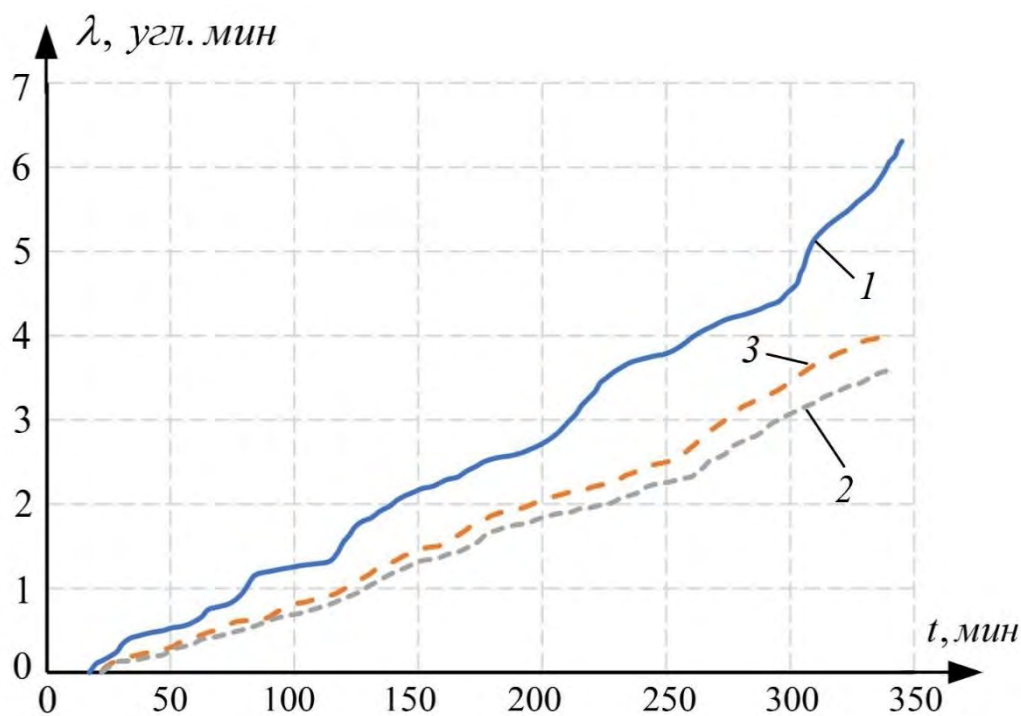


Рис. 4. Долгота и ее оценка.

На Рис. 4 введены следующие обозначения: 1 – реальные значения долготы, полученные в процессе эксперимента с ИНС; 2 – оценка долготы адаптивным НФК; 3 – оценка долготы адаптивным НФК с ПИ.

Для того, чтобы проверить работоспособность предложенного алгоритма, были проведены натурные испытания. БИНС и приемник СНС были установлены на автомобиле. Обработка сигналов проводилась с помощью АО и АО с ПИ. Результаты эксперимента представлены на Рис. 5, 6.

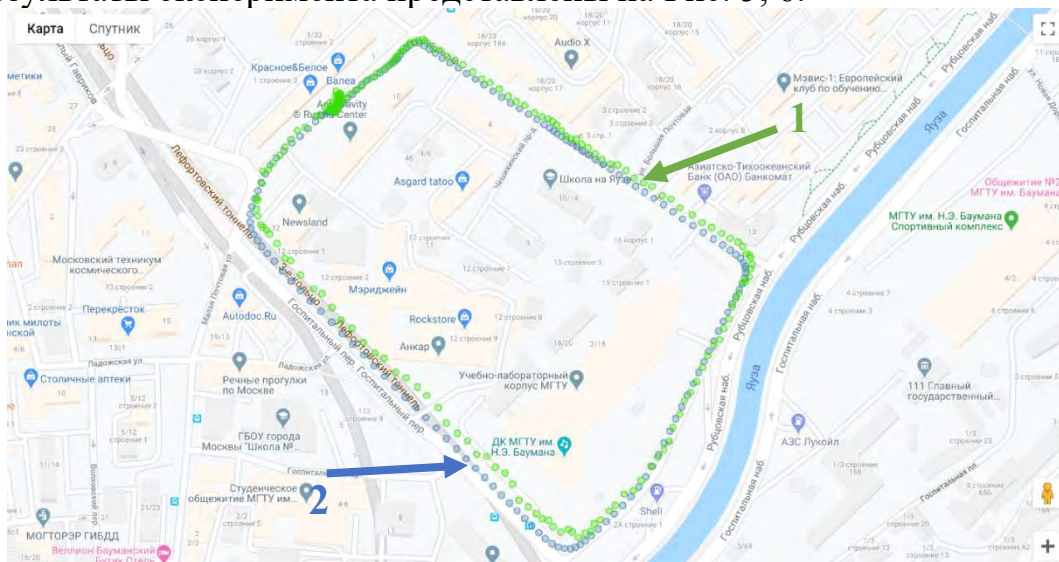


Рис.5. Погрешность БИНС с СНС и АО.

На Рис.5 обозначено: 1 – Сигнал БИНС с СНС и АО; 2 – истинные координаты маршрута.

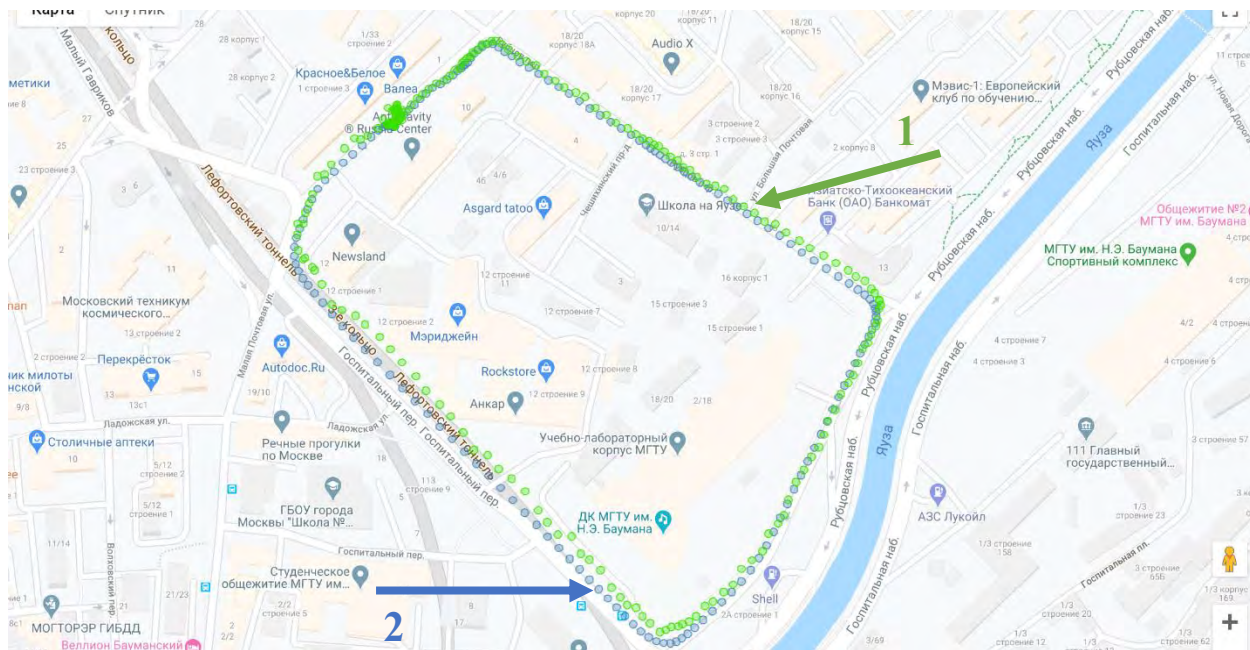


Рис.6. Погрешность БИНС с СНС и АО с ПИ.

На Рис. 6 обозначены: 1 – сигнал БИНС с СНС и АО и ПИ; 2 – истинные координаты маршрута.

Для того, чтобы проверить работоспособность предложенного алгоритма были проведены натурные испытания БЛА FH-80 с НК, снабженным различными алгоритмами. FH-80 — это БЛА вертикального взлета и посадки (Vertical Take-Off and Landing, VTOL), который может взлетать и садиться при нулевой горизонтальной скорости.

Полет осуществлялся на дистанции 500 м. В процессе эксперимента БЛА осуществлял вертикальный влет, перемещение на постоянной высоте с постоянной скоростью до точки посадки, вертикальное снижение. Координаты точки посадки известны. Фиксируется реальное отклонение БЛА от точки посадки. Полученные значения отклонений БЛА от заданной точки посадки зависят от точности НК. Сигналы GPS искажены помехами, погрешности ИНС с течением времени накапливаются, поэтому в НК осуществляется комплексная обработка сигналов GPS и ИНС. В процессе проведения эксперимента была проведена оценка точности НК с линейным фильтром Калмана (ФК), адаптивным линейным ФК (АФК), НФК, НФК с МНК, НФК с МГУА, НФК с ГА, НФК с НС и НФК с разработанной процедурой параметрической идентификации (НФК+ПИ). Точность НК, снабженного различными алгоритмами комплексной обработки информации сравнивалась с точностью автономной ИНС, которая сопоставима с точностью GPS в условиях помех.

Точность коррекции НК с помощью упомянутых алгоритмов и требуемый объем памяти при их реализации в спецвычислителе приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики алгоритмов

Алгоритмы	Точность коррекции (%)	Требуемый объем в памяти	Требуемый объем вычисления
ФК	72%	4 к	80 к
АФК	78%	5 к	100 к
НФК	81%	8 к	150 к
НФК+МНК	84%	16 к	180 к
НФК+МГУА	89%	20 к	1,000 к
НФК+ПИ	89%	10 к	200 к
НФК+НС	90%	30 к	3,000 к
НФК+ГА	91%	50 к	7,000 к

Объем памяти спецвычислителя малого БЛА составляет 256 кбт. В условиях жестких ограничений на вычислительные ресурсы максимальной точностью обладает разработанный адаптивный НФК с процедурой параметрической идентификации. Таким образом, НК НС-30 с разработанным алгоритмом коррекции позволяет с большей точностью получать навигационную информацию, что повышает эффективность малого БЛА FH-80.

Результаты математического, полунатурного моделирования, а также летных экспериментов продемонстрировали работоспособность и достаточно высокую точность алгоритмов, использующих математические модели с высокими степенями идентифицируемости неизвестных параметров.

Заключение содержит перечень основных новых результатов диссертационной работы.

Приложение содержит Акты об использовании результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Результаты проведенного системного анализа подходов, способов и критериев определения степени идентифицируемости параметров математических моделей НК малых БЛА.

2. Разработана простая процедура параметрической идентификации на основе скалярного подхода с использованием моделей с повышенными характеристиками параметрической идентифицируемости, отличающаяся от аналога повышенной точностью в среднем на 10% и уменьшением вычислительных затрат на 5-15% при реализации в спецвычислителе.

3. На основе проведенного анализа разработан оригинальный численный критерий степени идентифицируемости параметров нелинейных математических моделей, представленных посредством SDC-метода, который основан на использовании свойств матрицы наблюдаемости. Разработанный критерий отличается универсальностью, компактностью и простотой в использовании на практике.

4. Разработан способ формирования алгоритмов коррекции НК малого БЛА, позволяющий использовать нелинейные математические модели погрешностей ИНС с высокими степенями идентифицируемости параметров, что приводит к повышению точности коррекции в среднем на 5-8%.

5. Результаты математического, полунатурного моделирования и натурного эксперимента продемонстрировали работоспособность и достаточно высокую точность разработанных алгоритмов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Proletarsky A.V., Selezneva M.S., Qiaochu H. Intelligent Algorithm of Measuring Complex for Aircrafts // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). IEEE. 2018. P. 1-7.
2. Фильтр Калмана с линейным трендом в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов / Ху Цяоцу [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2019. №8, С. 20-27.
3. Формирование алгоритмов коррекции навигационного комплекса малого беспилотного летательного аппарата / Ху Цяоцу [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. №3, С. 1-8.
4. Ху Цяоцу. Исследование процедуры параметрической идентификации погрешностей инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т.75, №4, С. 183-186.
5. Исследование точности оценивания погрешностей инерциальной навигационной системы при вертикальном перемещении летательного аппарата / Ху Цяоцу [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т.72, №11, С. 517-522.
6. Ху Цяоцу. Идентификация параметров модели нелинейного фильтра Калмана // Научные разработки: евразийский регион. 2019. С. 252.
7. Разработка компактных алгоритмов параметрической идентификации для беспилотных летательных аппаратов / Ху Цяоцу [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т.73, №10, С. 473-479.
8. Оценивание состояния неопределённых систем / Ху Цяоцу [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т.73, №12, С. 558-563.
9. Исследование БИНС низкой точности для беспилотной машины / Ху Цяоцу [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т.74, №10, С. 463-469.

10. Параметрическая идентификация модели погрешностей инерциальной навигационной системы летательного аппарата / Ху Цяоцу [и др.] // Автоматизация. Современные технологии, 2021, Т.75, №7, С. 317-321.
11. Мин Я., Селезнева М.С., Ху Цяоцу. Высокоточный федеративный фильтр Калмана в комплексе средств, обеспечивающих посадку самолетов авианосного базирования // Будущее машиностроения России. 2018. С. 694-698.
12. Ли Ю., Ху Цяоцу, Пролетарский А.В. Нелинейный алгоритм коррекции навигационного комплекса с повышенной степенью параметрической идентифицируемости моделей // Будущее машиностроения России. 2018. С. 685-687.
13. Ху Цяоцу. Разработка процедуры идентификации параметров инерциальной навигационной системы // Будущее машиностроения России. 2020. С. 173-178.