

На правах рукописи

ЧЖАН ЛИФЭЙ

**АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ С ПОВЫШЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НАБЛЮДАЕМОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ
ДЛЯ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ АВИАНОСНОГО БАЗИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2022

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: Доктор технических наук, профессор
Неусыпин Константин Авенирович

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»

Андриков Денис Анатольевич
кандидат технических наук, доцент
Российского университета дружбы
народов

Ведущая организация: Рязанский государственный
радиотехнический университет имени
В.Ф. Уткина

Защита состоится 31 мая 2022 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, факультет «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 613м.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эксплуатационные характеристики летательных аппаратов (ЛА) в большой степени определяются совершенством бортового оборудования, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов, используемых для управления. Особо жесткие требования к бортовому оборудованию предъявляются к ЛА авианосного базирования. ЛА базируются на тяжелых авианесущих крейсерах (ТАКР). Для базирования на ТАКР Китая «Ляолин» используются истребители Су-33. Для ВМФ Индии на ТАКР «Адмирал Горшков» применяются высокоэффективные multifunctional боевые ЛА поколения 4+ для морской авиации МиГ-29К и МиГ-29КУБ (МиГ-29К/КУБ).

Главное отличие ЛА авианосного базирования от аналогичных, но полностью сухопутных ЛА состоит в возможности взлета и посадки в условиях движения ТАКР и особенностей его взлетно-посадочной полосы, что выдвигает дополнительные требования к комплексу бортового оборудования ЛА.

Для управления ЛА на всех этапах полета, в том числе на этапе посадки, необходима информация о навигационно-пилотажных параметрах его движения, которые определяются с помощью инерциальных навигационных систем (ИНС), спутниковой навигационной системы (СНС), радиотехнических навигационных систем, систем визуальной ориентации и др.

Современные ИНС имеют погрешности, которые с течением времени накапливаются. Для повышения точности ИНС применяются схемы алгоритмической коррекции, предусматривающие использование дополнительных измерительных систем, например СНС. Сигналы СНС также содержат ошибки, обусловленные слабой помехозащищенностью.

Реализация предпосадочного маневрирования и захода ЛА на посадку на движущийся ТАКР является наиболее сложным. Конечная цель захода на посадку – это выведение ЛА в заданную малую область воздушного пространства с заданными параметрами пространственного положения ЛА, где экипажем принимается решение о приземлении или об уходе на «второй круг». Для обеспечения посадки на ТАКР к инструментальным средствам предъявляются жесткие требования.

Навигационные системы ЛА объединены в навигационный комплекс (НК). Совместная обработка сигналов в НК позволяет существенно повысить точность навигационных определений.

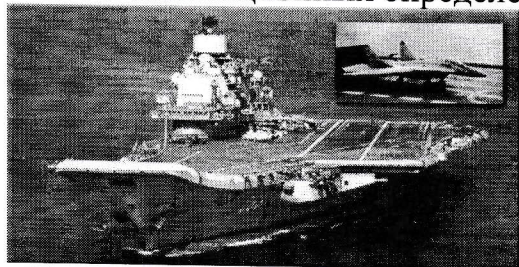


Рис. 1. Движущийся ТАКР

Большой вклад в создание современных НК и их алгоритмического обеспечения внесли Агеев В.М., Джанджава Г.И., Парусников Н.А., Селезнева М.С., Сотников В.И., Харин Е.Г., John W. Gichon, Lance Sherry,

Giarratano Joseph C., Piley Gary D.

Функциональная схема НК представлена на рисунке 2.

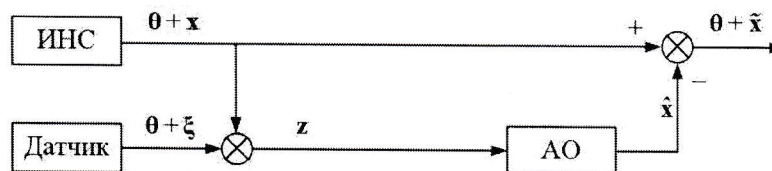


Рис. 2. Функциональная схема НК

Здесь введены следующие обозначения: θ – истинная информация о навигационных параметрах ЛА; x – вектор погрешностей ИНС; ξ – вектор погрешностей внешнего датчика; z – вектор измерений, представляющий собой смесь ошибок ИНС и СНС; АО – алгоритм оценивания; $\hat{x}$ – оценки погрешностей ИНС; $\tilde{x}$ – ошибки оценивания.

Основными требованиями к АО в процессе совершения маневрирования при заходе ЛА на посадку являются высокая точность, быстроедействие и надежность. Нелинейный фильтр Калмана (ФК) имеет высокую точность, но чувствителен к недостоверности априорной информации о модели оцениваемого процесса и сложен в реализации в БЦВМ. Федеративный ФК (ФФК) предполагает проведение большого объема вычислений и может применяться в НК при совершении ЛА предварительных маневров до маневра захода на глиссаду.

Для оценивания погрешностей ИНС в НК ЛА применяется адаптивный ФК (АФК) с жесткой обратной связью по обновляемой последовательности. Одним из способов дальнейшего повышения точности комплекса обработки информации (КОИ) НК является использование моделей с улучшенными характеристиками. Качественные характеристики моделей, которые используют в КОИ, могут быть различными, например степени наблюдаемости и управляемости переменных состояния моделей.

Большой вклад в разработку критериев оценки степени наблюдаемости и управляемости внесли Р.Г. Браун (1966 г.), Х.Л. Аблин, Ф.М. Хам, Шэнь Кай, Фам Суан Фанг, В.Н. Афанасьев, Н.Т. Кузовков, Н.А. Парусников, О.С. Салычев, В.В. Тютиков, В.М. Глумов, С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, А.Н. Жирабок. От качественных характеристик моделей, используемых в КОИ, зависит точность НК ЛА. Поэтому разработка критериев степени наблюдаемости и управляемости, а также способов их применения в КОИ НК ЛА является комплексом важных и актуальных задач.

Целью диссертационной работы является алгоритмическое повышение точности навигационной информации и управление ЛА авианосного базирования при заходе на посадку.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Разработка критерия степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем;
2. Разработка способа оценки степени управляемости переменных

состояния нестационарных систем;

3. Разработка модификации ФФК с улучшенными характеристиками для НК на этапе предварительных маневров до захода на глиссаду;

4. Разработка редуцированного ФФК с повышенным быстродействием;

5. Разработка нелинейной модификации ФФК с использованием критерия степени наблюдаемости переменных состояния;

6. Разработка линейного адаптивного ФК для использования в НК ЛА авианосного базирования, который удовлетворяет требованиям по точности, быстродействию и может быть использован при совершении маневра захода на посадку на движущийся ТАКР.

7. Исследование степени управляемости ЛА.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использовались методы теории автоматического управления, системного анализа, навигационных систем. Проверка эффективности разработанных алгоритмов проведена методом математического моделирования и моделированием по данным лабораторного эксперимента с реальными навигационными системами.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан оригинальный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем с использованием SDC-метода, отличающийся от аналога меньшим объемом предварительных вычислений и простотой использования в КОИ НК ЛА;

2. Разработан оригинальный способ оценки степени управляемости переменных состояния моделей с помощью критерия степени наблюдаемости и принципа дуальности. По сравнению с известными способами оценки степени управляемости применим к более широкому классу моделей;

3. Разработана модификация ФФК, которая по сравнению с прототипом обладает ускоренной селекцией моделей посредством критерия степени наблюдаемости;

4. Разработан редуцированный ФФК с упрощенной процедурой формирования моделей, отличающийся от аналога повышенным быстродействием при сохранении точности;

5. Разработан нелинейный ФФК с моделями, имеющими повышенные характеристики наблюдаемости и отличающийся от прототипа ускоренной сходимостью;

6. Разработан скалярный АФК с уточнением процедуры оценки дисперсии входного шума, отличающийся от аналога повышенной точностью.

Практическая ценность результатов исследования. Разработанные линейные и нелинейные АО позволяют повысить точность коррекции НК ЛА авианосного базирования. Разработанные качественные критерии позволяют повысить эффективность ФФК и использовать в алгоритмах оценивания модели оцениваемых процессов с улучшенными характеристиками наблюдаемости и управляемости. С помощью этих алгоритмов оценивания проводится оценка погрешностей ИНС и компенсируется значительная часть

погрешностей. Повышение точности навигационной информации ЛА особенно важно при осуществлении ЛА авианосного базирования предпосадочного маневрирования. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов подтверждаются четкими математическими выводами при разработке алгоритмов и критериев, результатами математического моделирования и моделирования по данным лабораторного эксперимента, а также согласованностью известных и полученных результатов.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Оригинальный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных моделей;
2. Оригинальный способ оценки степени управляемости переменных состояния модели;
3. Скалярный АФК с уточненной оценкой дисперсии входного шума;
4. Компактный редуцированный ФФК;
5. Модификации ФФК с критерием степени наблюдаемости;
6. Адаптивная модификация нелинейного ФФК, включающую модели с улучшенными характеристиками наблюдаемости.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: XI Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2018 г.); международная научная конференция теоретических и прикладных разработок «Научные разработки: евразийский регион» (Москва, 2019 г.); XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2019 г.); International Russian Automation Conference RusAutoCon 2020 (Сочи, 2020 г.) XLV Академические чтения по космонавтике «Королевские чтения» (Москва, 2021 г.) и научном семинаре кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, в том числе 11 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 6 работ в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, общим объемом 15.38 п.л./8.05 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка используемой литературы. Текст диссертации изложен на 114 машинописных страницах, содержит 39 рисунков. Список литературы содержит 113 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и направления исследований, проводимых в диссертационной работе, практическая значимость темы, а также приведено краткое содержание работы.

В первой главе рассмотрен способ захода на посадку ЛА авианосного базирования, используемые навигационные системы и НК для определения параметров современных ЛА, погрешности навигационных систем.

Сформулирована постановка задачи диссертационного исследования.

Во второй главе исследованы способы определения качественных характеристик моделей динамических систем.

Представлены критерии оценки наблюдаемости и управляемости линейных стационарных и нелинейных систем. Рассмотрены некоторые известные подходы к решению задач определения степени наблюдаемости и управляемости моделей динамических систем.

Известны разнообразные критерии оценки этих свойств. Определение этих свойств позволяет задать желаемые свойства системе на этапе проектирования. При разработке КОИ удастся использовать модели с желаемыми (улучшенными) свойствами.

Представлены наиболее известные критерии оценки структурных свойств моделей. Критерии оценки структурных свойств моделей часто являются методологической основой при исследовании их качественных характеристик.

При анализе нелинейных систем обычно используют различные способы линеаризации или эквивалентных преобразований. В работе использовано представление нелинейной системы в эквивалентном виде: модель имеет структуру линейных дифференциальных уравнений с параметрами, которые зависят от состояния (State Dependent Coefficient или SDC-представление).

Оценка степени наблюдаемости проводится по двум характеристикам (точности оценивания и времени сходимости).

Разработан критерий степени наблюдаемости, который имеет вид:

$$DoO_{Lk}^i = \frac{P_k^i R_k}{P_k R_{Lk}^{*i}} = \frac{P_k^i}{P_k \sum_{j=1}^n (\alpha_{j,k}^i)^2} \quad (1)$$

где P_0^i – дисперсия произвольной i -ой компоненты вектора состояния; P_0 – дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния.

Дисперсия приведенного к i -ой компоненте измерительного шума определяется коэффициентами α_i ($i = 1, \dots, n$), т.е.

$$R^{*i} = E[(\zeta^{*i})^2] = [\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2] R_0, \quad (2)$$

где $R_0 = E[v^2]$ – дисперсия исходного измерительного шума v ; α_i ($i = 1, \dots, n$) – i -я строка матрицы O^{-1} . O^{-1} существует, т.к. O – матрица наблюдаемости.

При определении степени управляемости переменных состояния моделей известные критерии имеют ряд ограничений и требуют трудоемких предварительных вычислений. Поэтому для оценки степени управляемости разработан более простой способ.

Рассмотрен принцип дуальности в системе с детерминированным воздействием u . Калман установил, что оптимальные решения P_k , K_k в этих двух задачах являются дуальными. Для оценки степени управляемости предложено исследовать сопряженную модель с помощью критерия степени наблюдаемости:

$$DoC_{Lk}^i = \frac{P_k^i R_k}{P_k R_{Lk}^{*i}} = \frac{P_k^i}{P_k \sum_{j=1}^n (\alpha_{j,k}^i)^2} \quad (3)$$

Предложен простой и удобный в применении способ определения степени управляемости переменных состояния системы с использованием свойства дуальности и критерия степени наблюдаемости конкретных компонент вектора состояния.

Разработка и исследование численного критерия степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем. Исследованы критерии степени наблюдаемости и управляемости нелинейных систем, выявлены их недостатки. Представлен численный критерий степени наблюдаемости конкретных переменных состояния нелинейных систем, базирующийся на SDC-представлении нелинейной модели.

В третьей главе приведены ФФК без обратной связи и с обратной связью. Для улучшения характеристик этих ФФК разработаны модификации ФФК с использованием критериев степени наблюдаемости.

В локальном ФК происходит процесс обновления по времени и обновления по измерениям, а в глобальном фильтре только комплексирование результатов из локальных фильтров.

Формулы для i -ого локального фильтра имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{x}_{i,k+1/k} &= \Phi_{k+1/k} \hat{x}_{i,k}; \\ P_{i,k+1/k} &= \Phi_{k+1,k} P_{i,k} \Phi_{k+1/k}^T + Q_{i,k+1}; \\ K_{i,k+1} &= P_{i,k+1/k} H_{i,k+1}^T (H_{i,k+1} P_{i,k+1/k} H_{i,k+1}^T + R_{i,k+1})^{-1}; \\ \hat{x}_{i,k+1} &= \hat{x}_{i,k+1/k} + K_{i,k+1} (z_{i,k+1} - H_{i,k+1} \hat{x}_{i,k+1/k}); \\ P_{i,k+1} &= (I - K_{i,k+1} H_{i,k+1}) P_{i,k+1/k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Комплексирование в глобальном фильтре

$$\begin{aligned} P_{g,k+1}^{-1} &= P_{1,k+1}^{-1} + P_{2,k+1}^{-1} + \dots + P_{N,k+1}^{-1}; \\ P_{g,k+1}^{-1} \hat{x}_{g,k+1} &= P_{1,k+1}^{-1} \hat{x}_{1,k+1} + P_{2,k+1}^{-1} \hat{x}_{2,k+1} + \dots + P_{N,k+1}^{-1} \hat{x}_{N,k+1}. \end{aligned} \quad (5)$$

После комплексирования в глобальном фильтре, локальные фильтры используют более точные результаты глобальной фильтрации на следующем

шаге. Чтобы пренебрегать корреляции между локальными фильтрами, ковариационные матрицы локальных фильтров настраиваются в соответствии с верхней границей ковариационной матрицы.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_i &= \hat{\mathbf{x}}_g; \\ \mathbf{P}_i^{-1} &= \beta_i \mathbf{P}_N^{-1}; \\ \mathbf{Q}_i^{-1} &= \beta_i \mathbf{Q}_N^{-1}.\end{aligned}\quad (6)$$

где β_i – коэффициенты распределения информации, принцип сохранения информации диктует, что коэффициенты распределения информацией суммируются до единицы:

$$\sum_{i=1}^N \beta_i = 1 (0 < \beta_i < 1). \quad (7)$$

Модифицированный федеративный Фильтр Калмана (МФФК)

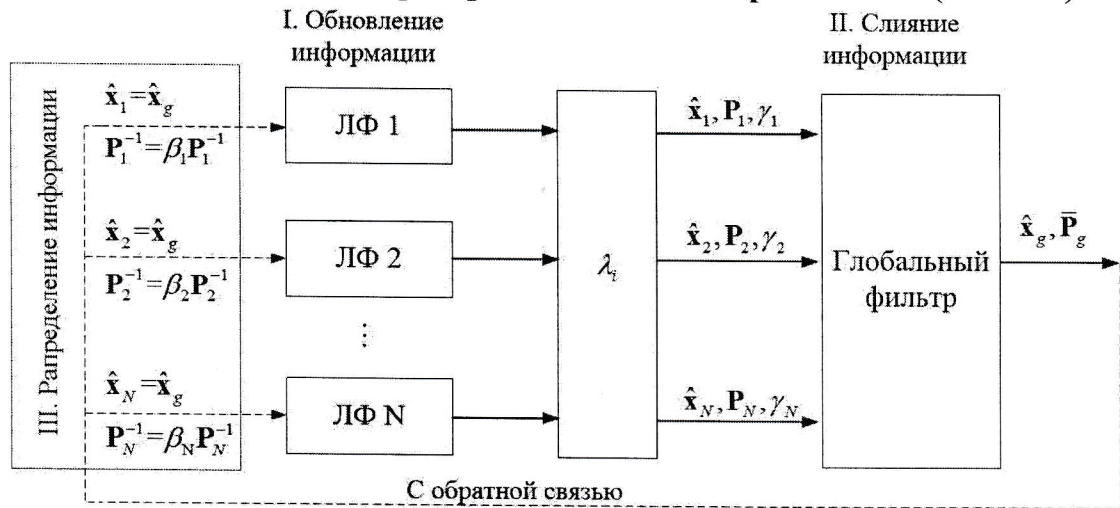


Рис. 3. Модифицированный ФФК с динамическими поправочными коэффициентами с использованием критерия степени наблюдаемости

Модифицированный федеративный фильтр Калмана без обратной связи. С учётом степени наблюдаемости, которые описывают точность оценивания и скорость сходимости каждого локального фильтра, определяются поправочные коэффициенты следующим методом.

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n DO^j}{n}, \quad (8)$$

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N}, \left(0 < \gamma_i < 1, \sum_{i=1}^N \gamma_i = 1 \right) \quad (9)$$

где γ_i – поправочные коэффициенты для локального фильтра; DO^j – степень наблюдаемости j -ого компонента вектора состояния, определяется формулой; λ_i – средняя степень наблюдаемости всех компонентов состояния i -ого локального фильтра. Чем больше γ_i , тем более верны результаты

оценивания данного фильтра. Результаты моделирования показали, что с помощью поправочных коэффициентов, точность и скорость сходимости глобального фильтра выше, чем обычный федеративный фильтр Калмана.

$$\bar{\mathbf{P}}_{g,k}^{-1} = \gamma_1 \mathbf{P}_{1,k}^{-1} + \gamma_2 \mathbf{P}_{2,k}^{-1} + \dots + \gamma_N \mathbf{P}_{N,k}^{-1}; \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{g,k}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{g,k} = \gamma_1 \mathbf{P}_{1,k}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{1,k} + \gamma_2 \mathbf{P}_{2,k}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{2,k} + \dots + \gamma_N \mathbf{P}_{N,k}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{N,k}.$$

где $\bar{\mathbf{P}}_{g,k}^{-1}$ – коэффициент нормализация; $\bar{\mathbf{P}}_{g,k}$ – эквивалентная робастная ковариационная матрица ошибок оценивания, $\bar{\mathbf{P}}_{g,k} \geq \mathbf{P}_{g, \text{настоящая}}$.

Модифицированный федеративный фильтр Калмана с обратной связью. В отличие от ФФК без обратной связи, в фильтре с обратной связью на каждом шаге локальные фильтры используют результат слияния $\hat{\mathbf{x}}_g$ и $\bar{\mathbf{P}}_g$ предыдущего шага. Происходит обмен информацией во всех локальных фильтрах и эта информация будут ещё раз анализироваться на этапе комплексирования информации (6). Из-за введенного поправочного коэффициента γ_i сумма настоящих коэффициентов распределения информации $\sum_{i=1}^N \beta_i$ может быть не равна 1. Установка коэффициентов должна удовлетворять следующим двум условиям:

$$\beta_i = \frac{1}{N} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N \gamma_i = N \quad (12)$$

Таким образом, поправочные коэффициенты для фильтра с обратной связью имеют вид:

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N} N \quad (13)$$

Если $\beta_i = \frac{1}{N}$, т.е. $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2 \dots \mathbf{P}_N$ в локальном фильтре были увеличены на N раз, $\mathbf{P}_i \geq N \mathbf{P}_{i, \text{настоящая}}$. Поэтому выполняется условие $\bar{\mathbf{P}}_{g,k} \geq \mathbf{P}_{g, \text{настоящая}}$.

Из-за обмена информацией между локальными фильтрами, точность и скорость сходимости ФФК выше, чем фильтра без обратной связи. Эффект поправочных коэффициентов очевиден в первые 30-40 минут, особенно для скорости сходимости. Когда система уже сходится, эффект поправочных коэффициентов будет уменьшен, но точность данного способа будет не ниже обычного ФФК.

ФФК пониженного порядка. Количество вычисления обычно резко возрастает при в вычислении ковариационной матрицы ошибок оценивания для системы повышенного порядка. Порядок ФК снижен с помощью редуцирования модели на основе использования критерия степени

наблюдаемости. Слабонаблюдаемые компоненты исключаются из вектора состояния системы.

Анализируя значения степеней наблюдаемости можно судить о целесообразности использования тех или иных компонент вектора состояния. Для комплексирования информации из фильтров разных порядков или разных параметров, введен ФФК с разными локальными моделями.

Для глобального пространства состояний Ω и локального пространства состояний Ω_i существуют следующие отношения отображения

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_i : \Omega \rightarrow \Omega_i \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \max(\dim \Omega_i) \leq m \leq \dim \left(\sum_{i=1}^N \Omega_i \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Ω_i является подпространством Ω , вектор состояния подпространства может быть выражен как

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{x}_g \quad (15)$$

Тогда комплексирование в глобальном фильтре будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_g^{-1} &= \sum_{i=1}^N \mathbf{T}_i' \mathbf{P}_i^{-1} \mathbf{T}_i \\ \hat{\mathbf{x}}_g &= \mathbf{P}_g \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{T}_i' \mathbf{P}_i^{-1} \hat{\mathbf{x}}_i \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Информационное распределение

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i^{-1} &= \beta_i \mathbf{T}_i \mathbf{P}_i^{-1} \mathbf{T}_i' \\ \hat{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{T}_i \hat{\mathbf{x}}_g \end{aligned} \quad (17)$$

Когда $\mathbf{T}_i$ является единичной матрицей, тогда алгоритм работает как обычный ФФК.

Рассмотрен ФФК с двумя локальными фильтрами ИНС/АНС(астронавигационная система) и ИНС/СНС.

Исследуя степени наблюдаемости компонент вектора состояния локальных системы осуществляется сортировка степеней наблюдаемости и выбирается вектор состояния модели.

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 12} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 12} \end{bmatrix}_{6 \times 15}, \quad \mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & & \\ & & \mathbf{I}_{8 \times 8} & \\ & & & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 15}. \\ \mathbf{H}_1 &= [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}]^T, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 5} \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \text{diag}(R_M \quad R_N \cos L \quad 1) & \mathbf{0}_{3 \times 5} \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \quad (18)$$

Адаптивный ФК для коррекции навигационной информации при заходе на посадку ЛА на ТАКР. Совместная обработка сигналов в НК осуществляется с помощью АФК, способного функционировать в условиях

отсутствия априорной информации о статистических характеристиках входного шума. Для упрощения реализации при использовании интенсивного маневрирования ЛА разработан АФК, реализованный в скалярном виде.

В скалярном АФК оценка i -ой компоненты в $nk+1$ -й момент:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{nk+1}^i &= a_{ii}\hat{x}_{n(k-1)+1}^i + s_k^i + k_k^i (z_{k+1}^{*i} - a_{ii}\hat{x}_{n(k-1)+1}^i - s_k^i) \\ k_k^i &= \frac{p_{k,k-1}^i}{p_{k,k-1}^i + r_k^i} \\ p_{k,k-1}^i &= a_{ii}^2 (1 - k_{k-1}^i) p_{k-1,k-2}^i + q_{k-1}^i \\ \Delta q_k^i &= (\nu_k^{*i})^2 - [k_{k-1}^i]^{-1} p_{k-1|k-2}^i\end{aligned}\quad (19)$$

где

$$\begin{aligned}s_1^i &= a_{i1}z_1^{*1} + a_{i2}z_1^{*2} + \dots + a_{in}z_1^{*n}; \\ w_1^{*i} &= a_{i1}v_1^{*1} + a_{i2}v_1^{*2} + \dots + a_{in}v_1^{*n} + w_1^i; \\ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} &= \Phi^n; \quad \begin{bmatrix} w_1^1 \\ w_1^2 \\ \dots \\ w_1^n \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \Phi^{j-1} w_{n+1-j}; \\ z_1^* &= \begin{bmatrix} z_1^{*1} \\ z_1^{*2} \\ \dots \\ z_1^{*n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \dots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix}; \quad v_1^* = \begin{bmatrix} v_1^{*1} \\ v_1^{*2} \\ \dots \\ v_1^{*n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \dots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ Hw_1 + v_2 \\ \dots \\ H\Phi^{n-2}w_1 + \dots + Hw_{n-1} + v_n \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Допустим дисперсия i -ой компоненты

$$\bar{q}_k^i = q_k^i + \Delta q_k^i \quad (20)$$

то

$$\Delta q_k^i = (\nu_k^{*i})^2 - [k_{k-1}^i]^{-1} p_{k-1|k-2}^i, \quad (21)$$

где $\nu_k^i = z_k^{*i} - \hat{x}_k^i$.

Коррекция навигационных систем при использовании модификации нелинейного ФК. При совершении ЛА маневров углы отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) ИНС относительно выбранной системы координат увеличиваются и модель ее погрешностей становится неадекватной реальному процессу.

При оценивании погрешностей ИНС при использовании сложных моделей необходимо осуществлять идентификацию параметров и структуры модели в процессе функционирования системы. Но такой подход требует большего времени на реализацию и сопряжен с проблемами вычислительного характера. Поэтому предложено использовать в НФК модели погрешностей ИНС с повышенными характеристиками наблюдаемости.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований. Результаты математического моделирования. Используются тестовые линейная и нелинейная модели ошибок ИНС.

Таблица 1.

Точности оценивания ФФК и МФФК

СКО параметров	ФФК без обратной связи	МФФК без обратной связи	ФФК с обратной связью	МФФК с обратной связью
δV (м/мин)	13,441	12,258	11,614	11,401
Φ (рад)	2,737e-5	1,819e-5	1,727e-5	1,536e-5
ε (рад/мин)	1,461e-6	1,269e-6	1,202e-6	1,164e-6

Результаты математического моделирования показали, что модифицированный ФФК позволяет быстрее получить состоятельные оценки ошибок ИНС, чем классический ФФК.

Полученные точности оценивания нелинейных погрешностей ИНС приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Точности оценивания ФФК и МФФК

СКО параметров	ФФК без обратной связи	МФФК без обратной связи	ФФК с обратной связью	МФФК с обратной связью
δV (м/мин)	13,523	12,412	11,650	11,424
Φ (рад)	2,958e-5	1,965e-5	1,982e-5	1,667e-5
ε (рад/мин)	1,745e-6	1,521e-6	1,533e-6	1,346e-6

Таблица 3.

Точности оценивания ФФК и ФФК пониженного порядка

СКО	Классический ФФК	ФФК пониженного порядка
δV (м/мин)	4,6708	5,3846
Φ (рад)	5,6314	8,2881
ε (рад/мин)	3,1630	3,5727

С помощью анализа степени наблюдаемости исключаются слабонаблюдаемые переменные состояния. ФФК пониженного порядка составляет только 50% количества вычисления классического фильтра, а точность оценивания практически не снижается.

Предложенный АФК позволяет быстро адаптироваться к изменению Q и обеспечивать точность фильтрации.

Модифицированный скалярный АФК работает с приемлемой точностью, позволяет сократить время счета, скорость вычислений значительно

увеличена. По сравнению с известным скалярным АФК точность увеличена на 5-7%.

Моделирование по данным лабораторного эксперимента с реальной ИНС проводилось с использованием классического ФК, обычного АФК и предложенного МАФК.

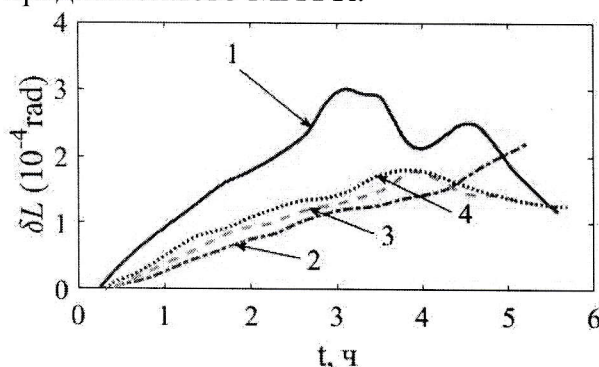


Рис. 4. Погрешности ИНС в определении широты и их оценки

На Рис. 4 обозначены: 1 — погрешности в определении широты местности, полученные в процессе лабораторного эксперимента; 2 — оценки погрешностей реальной системы, полученные ФК; 3 — оценки погрешностей реальной системы, полученные с помощью АФК; 4 — оценки погрешностей реальной системы, полученные с помощью разработанного МАФК.

Для анализа степени управляемости ЛА используется модель продольного движения ЛА. На Рис. 5, 6 показаны значения предложенного численного критерия степени управляемости для каждой компоненты вектора состояния.

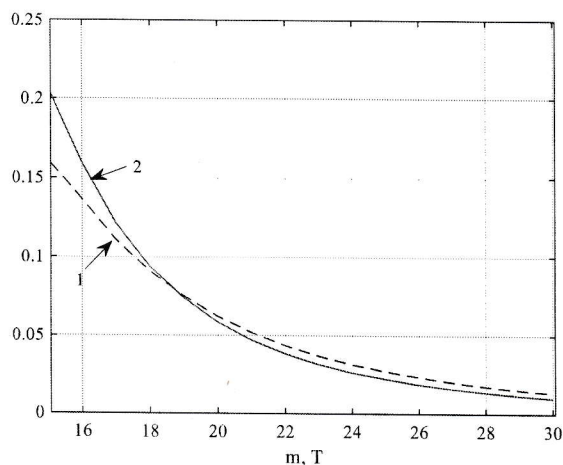


Рис. 5. Степень управляемости скорости u : 1 — руль высоты; 2 — тяга.

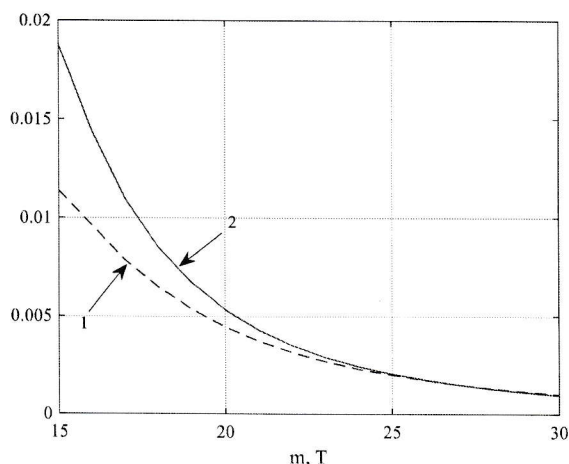


Рис. 6. Степень управляемости скорости w : 1 — руль высоты; 2 — тяга.

С увеличением массы ЛА, степени управляемости уменьшаются. Когда масса ЛА превышает 20 т, способность управления ЛА сильно ухудшается, поэтому на практике максимальная посадочная масса намного меньше максимальной взлетной массы.

Для оценки качества управления регулятора исследованы значения среднеквадратического отклонения (СКО) каждой компоненты при различных массах ЛА. Результаты моделирования представлены на Рис. 7, 8. При увеличении массы m , степени управляемости ухудшается, точность управления снижается.

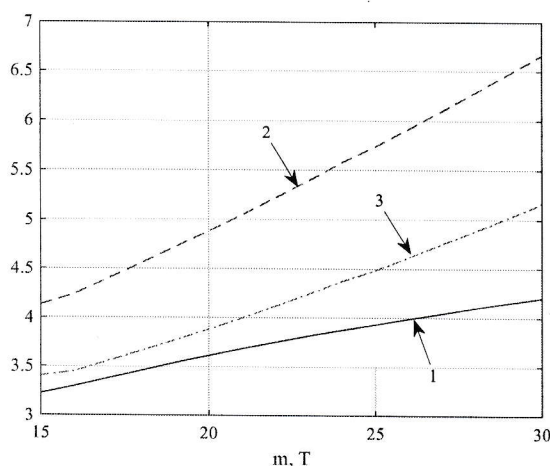


Рис. 7. СКО переменных состояния:
1 – u ; 2 – w ; 3 – q .

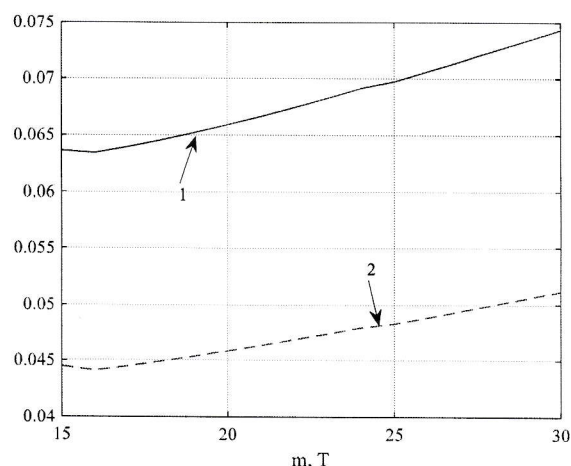


Рис. 8. СКО переменных состояния:
1 – θ ; 2 – h .

В заключении сформулированы основные полученные результаты.

Основные результаты работы

1. Разработан оригинальный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем с использованием SDC-метода, отличающийся от аналога меньшим объемом предварительных вычислений и простотой использования в НК ЛА;

2. Разработан оригинальный способ оценки степени управляемости переменных состояния моделей с помощью критерия степени наблюдаемости и принципа дуальности. По сравнению с известными способами оценки степени управляемости применим к более широкому классу моделей;

3. Разработана модификация ФФК, которая по сравнению с прототипом обладает ускоренной селекцией моделей посредством критерия степени наблюдаемости. Ускорение получения оценок погрешностей ИНС заданной точности составляет в среднем 10%;

4. Разработан редуцированный ФФК с упрощенной процедурой формирования моделей, отличающийся от аналога повышенным быстродействием;

5. Разработан нелинейный ФФК с моделями, имеющими повышенные характеристики наблюдаемости и отличающийся от прототипа ускоренной сходимостью (быстрее на 10%) при сохранении точности;

6. Разработан скалярный АФК с уточнением процедуры оценки дисперсии входного шума, отличающийся от аналога повышенной точностью (точнее в среднем на 5-7%);

7. Разработанные линейные и нелинейные АО позволяют повысить точность коррекции НК ЛА авианосного базирования.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В качестве расширения темы предполагается разработка перспективных и универсальных алгоритмов коррекции навигационных систем с повышенными качественными характеристиками степеней наблюдаемости, управляемости, идентифицируемости, устойчивости и чувствительности.

Основные публикации по теме диссертации

1. A new adaptive Kalman filter for navigation systems of carrier-based aircraft / Zhang L. [et al.] // Chinese journal of aeronautics. 2022. Vol. 35, no. 1. P. 416-425. (1,2 п.л. / 0,5 п.л.)
2. Adaptive estimation algorithm for correcting low-cost MEMS-SINS errors of unmanned vehicles under the conditions of abnormal measurements / Zhang L. [et al.] // Sensors. 2021. Vol. 21, Issue 2, no. 623. P. 1-16. (1,2 п.л. / 0,5 п.л.)
3. Zhang L., Neusypin K. A., Selezneva M.S. A new method for determining the degree of controllability of state variables for the LQR problem using the duality theorem // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 15. P. 5234. (1,3 п.л. / 0,5 п.л.)
4. A Novel Adaptive H-Infinity Cubature Kalman Filter Algorithm Based on Sage-Husa Estimator for Unmanned Underwater Vehicle / Zhang L. [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. 2020. (1,2 п.л. / 0,5 п.л.)
5. Чжан Л. Оценка качества управления полетом летательного аппарата авианосного базирования с использованием критерия степени управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2021. № 12. С. 10-18. (1 п.л.)
6. Интеллектуальный селективный навигационный комплекс с критерием оценки качества информации / Чжан Л. [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021, № 6. С. 37-47. (1,2 п.л. / 0,5 п.л.)
7. Чжан Л., Селезнева М.С. Модификация федеративного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем беспилотного летательного аппарата // Инженерная физика. 2020. № 1. С. 40-50. (1,1 п.л. / 0,4 п.л.)
8. Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Оценка степени управляемости линейных динамических систем на основе принципа дуальности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 4. С. 40-50. (1,1 п.л. / 0,4 п.л.)
9. Чжан Л. Улучшение характеристик нелинейных моделей динамических систем // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74, № 9. С. 408-412. (0,9 п.л.)
10. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана / Чжан Л. [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9-18. (1 п.л. / 0,35 п.л.)
11. Модификация федеративного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов авианосного базирования / Чжан Л. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73, № 4. С. 177-180. (0,9 п.л. / 0,4 п.л.)
12. Исследование точности оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем при вертикальном перемещении летательного аппарата / Чжан Л. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72, № 11. С. 517-522. (0,9 п.л. / 0,4 п.л.)
13. Оценивание состояния неопределённых систем / Чжан Л. [и др.] //

Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73, № 12. С. 558-563. (1 п.л. / 0,4 п.л.)

14. Фильтр Калмана с линейным трендом в схеме коррекции навигационной системы летательного аппарата / Чжан Л. [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 8. С. 20-27. (1 п.л. / 0,35 п.л.)

15. Алгоритм оценивания навигационного комплекса летательного аппарата / Чжан Л. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74, № 4. С. 176-180. (0,85 п.л. / 0,35 п.л.)

16. Селезнева М.С., Чжан Л., Неусыпин К. А. Применение критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. С. 698-701. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

17. Чжан Л., Неусыпин К. А. Способ определения степени управляемости переменных состояния моделей с использованием численного критерия степени наблюдаемости // Научные разработки: евразийский регион: материалы международной научной конференции теоретических и прикладных разработок. М.: Изд-во Инфинити, 2019. С. 247-252. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

18. Модификация федеративного фильтра Калмана с помощью критерия степени наблюдаемости переменных состояния / Чжан Л. [и др.] // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 53-56. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

19. Zhang L., Neusypin K. A. Classification of the qualitative concepts of observability controllability and identifiability of dynamical systems // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE Press, 2020. P. 846-850. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

20. Федеративный фильтр Калмана с критерием степени наблюдаемости переменных состояния / Чжан Л. [и др.] // XLV Академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 401-403. (0,38 п.л. / 0,15 п.л.)