

ЧЖАН СИНЬКЭ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ  
ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА  
БЕСПИЛОТНУЮ МАШИНУ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

张鑫科

Москва – 2023

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: **Селезнева Мария Сергеевна**, к.т.н, доцент  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Дивеев Асхат Ибрагимович**, доктор технических наук, профессор Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», отдел 55  
управление робототехническими устройствами

**Шелагурова Марина Сергеевна**, кандидат технических наук, начальник сектора АО РПКБ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)». 109428, г. Москва, Волоколамское ш., 4.

Защита состоится 12 марта 2024 г. В 14 час 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования 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 ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.331.14

Муратов Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы беспилотные летательные аппараты (БЛА) и беспилотные транспортные средства (БМ) привлекают все больше внимания и широко используются во многих областях, таких как аэрофотосъемка, помощь при стихийных бедствиях и экспресс-логистика. В традиционных приложениях БЛА имеют широкое поле зрения и могут выполнять надзорные и инспекционные задачи в широком диапазоне, а также своевременно обнаруживать различные чрезвычайные ситуации и катастрофы. Однако БЛА имеют короткое время полета и низкую грузоподъемность. БМ имеют большую грузоподъемность и большую длительность функционирования, но плохую проходимость и ограниченную дальность обзора. Поэтому скоординированная групповая работа БЛА и БМ может увеличивать их эффективность и компенсировать их слабые стороны, чтобы обеспечить гарантии выполнения поставленных задач. По сравнению с традиционным применением только БЛА или БМ, комбинация их может расширить рабочий диапазон беспилотных систем и повысить их адаптивность к различным рабочим средам.

Разница между БЛА на базе БМ и традиционными летательными аппаратами заключается в более сложном процессе взлета и посадки, происходящем в процессе движения БМ. Эти особенности определяют дополнительные требования к БЛА и БМ в комплексном системном оборудовании. Для обеспечения эффективного управления БЛА в полете, особенно при посадке на платформу БМ, необходимо обеспечить достоверность навигационно-управляющей информации БЛА. Информацию системы обеспечивают инерциальная навигационная система (ИНС), спутниковая навигационная система (СНС), система ближней радиосвязи, система обзора и др. ИНС представляет собой автономную навигационную систему, которая не опирается на внешнюю информацию, но ее ошибки со временем будут накапливаться и в итоге достигнут недопустимого уровня. Системная ошибка СНС не накапливается со временем, но шумоподавляющие характеристики плохие, а сигнал легко теряется из-за помех. Другие информационно-измерительные системы также имеют специфические ошибки.

На посадочном этапе БЛА затрудняется навигация и управление из-за ограничения площади посадочной площадки и ее движения. Этот этап включает идентификацию и отслеживание беспилотных платформ, а также навигацию и управление БЛА. Это выдвигает более высокие требования к интегрированной системе навигации и управления.

В данной работе для обеспечения точной посадки БЛА на платформу БЛА система навигации и управления летательным аппаратом выполнена в виде навигационного комплекса (НК). Алгоритм оценки используется в интегрированной навигационной системе для повышения точности позиционирования системы.

В настоящее время исследования по посадке БЛА на различные транспортные средства в основном ведутся в России, Китае, Европе и США. Алгоритмические решения данной задачи предложили Никулин А.С., Селезнева М.С., Чжан Лифэй, Жуйян Чжоу, коллективы Пекинского технологического института, исследовательские группы Цюрихского университета, Школы электротехники

Чешского технического университета, и Planck Aviation (США). Для решения задачи посадки БЛА на БМ используется НК, снабженные алгоритмическое обеспечение и система управления БЛА. В процессе реализации посадки БЛА необходимо решить ряд задач, таких как позиционирование БЛА, идентификация и сопровождение БЛА и БМ, навигация и управление БЛА в сложных ситуациях.

Таким образом, выбор способа реализации посадки БЛА на движущуюся БМ и разработка алгоритмов обработки информации НК, обеспечивающих высокую точность навигационных определений является важным и актуальным комплексом задач. Решение этого комплекса задач обеспечит повышение точности управления БЛА и решение задачи его посадки на БМ.

**Целью работы** является разработка и исследование методов и алгоритмов обработки информации при реализации процесса посадки БЛА на движущуюся БМ.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проанализированы существующие способы посадки БЛА на БМ и принципы работы навигационных систем.
2. Разработаны методы относительной навигации БЛА и БМ.
3. Разработана функциональная схема НК БЛА
4. Разработаны алгоритмы фильтрации для решения задачи относительной навигации БЛА и БМ.
5. Проведено компьютерное моделирование движения БЛА относительно БМ, алгоритмов обработки информации НК БЛА и проведена экспериментальная проверка результатов моделирования.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан метод посадки БЛА на подвижное основание с использованием радиомаяков.
2. Разработана функциональная схема навигационного комплекса БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего радиуса действия.
3. Разработан алгоритм коррекции НК на основе адаптивного фильтра Калмана, с фактором забывания и распределенной структурой.
4. Предложен алгоритм коррекции НК с интеллектуальной компонентой в составе ИНС/ГНСС/СШП на основе федеративного фильтра Калмана.
5. Предложен алгоритм спуска БЛА, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов. Предлагаемый способ обеспечивает выполнение задачи по посадке БЛА на подвижную платформу.

**Достоверность и обоснованность** полученных теоретических и практических результатов подтверждаются корректным использованием базовых методов и математических положений при разработке алгоритмов, а также согласованностью известных и полученных в работе результатов.

**Практическая значимость результатов исследования.**

Разработанная функциональная схема НК позволяет реализовать процесс посадки БЛА на движущуюся БМ на основе сигналов от различных систем и датчиков, с учетом разных требований, определяемых условиями функционирования БЛА и БМ. Разработанные алгоритмы коррекции НК обеспечивают работоспособность и высокую точность навигации БЛА при выполнении посадки.

Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана и при реализации технического проекта в университете Хэбэй (Баодин, КНР)

**Методы исследования.** При решении задач диссертационного исследования использовались методы теории автоматического управления, системного анализа, теории оценивания и математического моделирования.

**Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.**

- 1) Метод посадки БЛА на подвижное основание с использованием радиомаяков.
- 2) Функциональная схема НК БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего радиуса действия.
- 3) Алгоритм коррекции НК на основе адаптивного фильтра Калмана, с фактором забывания и распределенной структурой.
- 4) Алгоритм коррекции НК с интеллектуальной компонентой в составе ИНС/ГНСС/СШП на основе федеративного фильтра Калмана.
- 5) Алгоритм спуска БЛА на подвижную БМ, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов.

**Апробация работы.** Диссертационная работа в целом и основные результаты работы обсуждались и докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

- 6) Двенадцатая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов "будущее машиностроения России" (Москва, 2019);
- 7) XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2020);
- 8) Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (Сочи, 2022);
- 9) XLVI Академические Чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2022).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 12 научных работах, в том числе – 7 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ, 2 статьи из перечня международных научных изданий, включенных в базу данных IEEE и Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 137 печатных страницах, включая 52 рисунка, 5 таблиц. Список литературы содержит 85 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, выделена ее научная значимость, сформулирована цель работы, научная и практическая значимость, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также сведения о реализации и публикациях полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены особенности и проблемы совместной работы БЛА и БМ, сообщается, что БЛА и БМ могут использоваться в комбинации, описывается история развития, базовая структура и принцип работы различных типов БЛА, а также проводится сравнение различных типов БЛА. представлены

недостатки различных типов БЛА, а также представлены основные устройство и функции посадочной платформы БМ. Уточнены цель и задачи диссертационной работы.

В настоящее время существует в основном три типа совместных рабочих структур БЛА и БМ: централизованная структура, децентрализованная структура и гибридная структура.

В гибридной структуре БЛА и БМ имеют автономию и могут выполнять задачи независимо друг от друга. В то же время БЛА и БМ осуществляют обмен информацией через систему связи, координируют друг с другом и совместно выполняют поставленную задачу. Преимущество этой структуры заключается в том, что она не только требует меньше вычислительных ресурсов, но и может улучшить координацию между БЛА и БМ для выполнения более сложных задач.

В данной работе рассмотрена системная структура совместной работы БЛА и БМ.



Рис.1. Беспилотная машина, которая взаимодействует с БЛА

Во второй главе определены различные системы координат, использованные в процессе приземления БЛА, а также представлен принцип работы ИНС, принцип позиционирования спутниковой навигационной системы и принцип позиционирования сверхширокополосной системы. Приведен принцип работы системы, используемой в процессе посадки БЛА. Анализируется метод относительного инерциального позиционирования на основе ИНС.

Исследована модель относительного движения между БЛА и БМ

В процессе приземления БЛА, относительное позиционное соотношение между БЛА и БМ показано на рисунке 2.

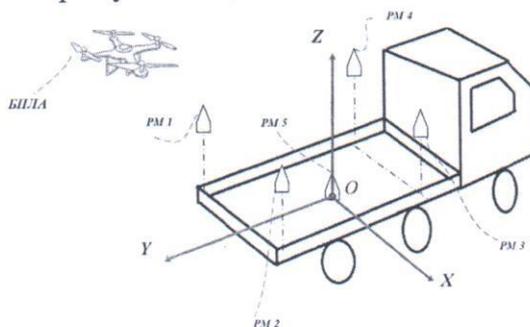


Рис.2. Процесс посадки БЛА на БМ

где,  $PM_1, PM_2, PM_3, PM_4, PM_5$  – радиомаяк.

Определено относительное положение  $P_{mi}^u$ , которое используется для представления проекции системы координат корпуса БЛА в систему координат носителя БМ. Связь между ними выражена как:

$$P_{mi}^u = C_i^u (P_{iu}^i - P_{im}^m) \quad (1)$$

Где  $C_i^u$  — матрица преобразования

В третьей главе разработаны алгоритм адаптивного фильтра Калмана, основанный на факторе забывания, и объединенный фильтр Калмана, основанный на распределенной структуре. Приведен алгоритм коррекции интегрированной навигационной системы ИНС/ГНСС/СШП на основе федеративного фильтра Калмана, позволяющий оценивать погрешности НК в нелинейной постановке задачи. На основе теории функциональных систем П.К. Анохина разработан НК с интеллектуальной компонентой для БЛА.

В соответствии с разработанной структурой НК в качестве базовой системы используется ИНС, а GNSS и UWB в качестве дополнительной системы соответственно; информация об оценке состояния каждого подфильтра объединяется через основной фильтр, таким образом получается глобальная оптимальная оценка; наконец, глобальная информация о слиянии основного фильтра распределяется по каждой системе подфильтров в соответствии с разработанным критерием распределения информации, и при помощи обратной связи корректируется угловое отклонение БИНС.

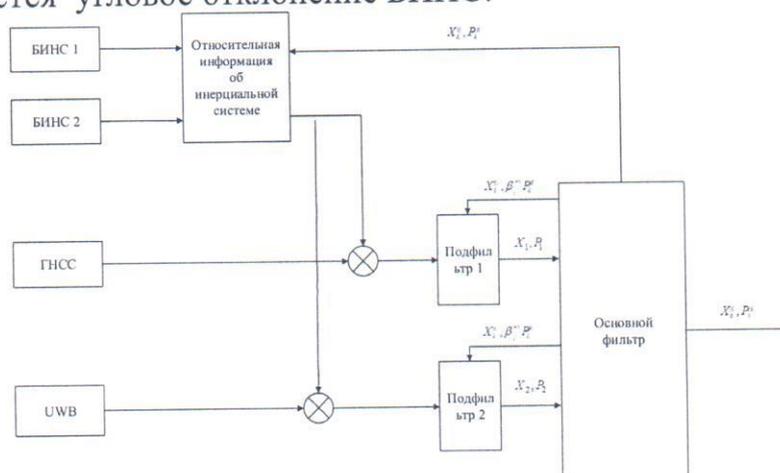


Рис.3. НК с федеративным фильтром Калмана

где,  $UWB$  – Ultra-Wide Band,  $X_1, P_1$  – Оценка состояния и дифференциальная матрица подфильтра 1,  $X_2, P_2$  – Оценка состояния и дифференциальная матрица подфильтра 2,  $X_g^t, P_g^t$  – Оценка состояния и Дифференциальная матрица основного подфильтра,  $\beta$  – Коэффициент распространения информации.

Рабочие этапы федеративного фильтра включают четыре части: распространение информации, обновление времени, обновление измерений и объединение информации. Для подфильтров рассматривается возможность использования расширенной оценки изображения фильтра Калмана. При этом для устранения дополнительных шумов, вызванных нестабильными факторами, был рассмотрен адаптивный фильтр Калмана на основе фактора забывания.

- 1) распространение информации

$$\begin{cases} \hat{X}_k^i = \hat{X}_k^g \\ (P_k^i)^{-1} = \beta_i (P_k^g)^{-1} \\ (Q_k^i)^{-1} = \beta_i (Q_k^g)^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

2) обновление времени

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k/k-1}^i &= \Phi_{k/k-1} X_{k-1}^i \\ P_{k/k-1}^i &= F_{k/k-1} P_{k-1}^i \Phi_{k/k-1}^T + G_{k/k-1} Q_{k-1}^i G_{k/k-1}^T \end{aligned} \quad (3)$$

3) обновление измерений

$$\begin{aligned} K_k^i &= P_{k/k-1}^i (H_k^i)^T (H_k^i P_{k/k-1}^i (H_k^i)^T + R_k^i)^{-1} \\ \hat{X}_k^i &= \hat{X}_{k/k-1}^i + K_k^i (Z_k^i - H_k^i \hat{X}_{k/k-1}^i) \\ P_k^i &= (I - K_k^i H_k^i) P_{k/k-1}^i \end{aligned} \quad (4)$$

4) объединение информации

$$\begin{aligned} P_k^g &= \left[ \sum_{i=1}^2 (P_k^i)^{-1} \right]^{-1} \\ X_k^g &= P_k^g \sum_{i=1}^2 (P_k^i)^{-1} X_k^i \end{aligned} \quad (5)$$

### НК с интеллектуальной компонентой

НК с интеллектуальной компонентой позволяет изменять структуру измерительных элементов, а также изменять конфигурацию алгоритмического обеспечения.

Результаты обработки информации определяют оптимальный состав НК. В процессе эксплуатации проводятся измерения, рассчитываются значения критериев выбора с использованием каждого внешнего датчика, строятся модели, делаются прогнозы и сравниваются прогнозы с результатами действий, оцениваются векторы состояния, включая ошибки ИНС, и корректируются ошибки ИНС.

Разработана структура НК БЛА.

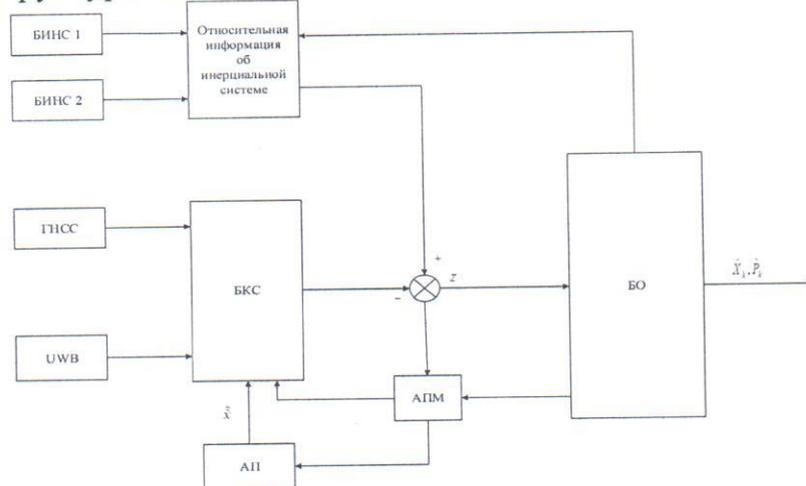


Рис.4. Функциональная схема алгоритмического обеспечения НК

На рис.4 введены следующие обозначения:  $UWB$  – Ultra-Wide Band,  $\hat{X}_g, \hat{P}_g$  – оценки погрешностей,  $\hat{X}$  – прогноз погрешностей,  $БКС$  – блок комплексирования и сравнения,  $АПМ$  – алгоритм построения моделей,  $БО$  –

блок оценивания, *АП* – алгоритм прогноза.

**Адаптивный навигационный комплекс БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего действия.** НК состоит из трех частей, первая часть состоит из БИНС и СНС, размещенных на БЛА, вторая часть состоит из БИНС и СНС, размещенных на БМ, а третья часть представляет собой радиомаячную систему.

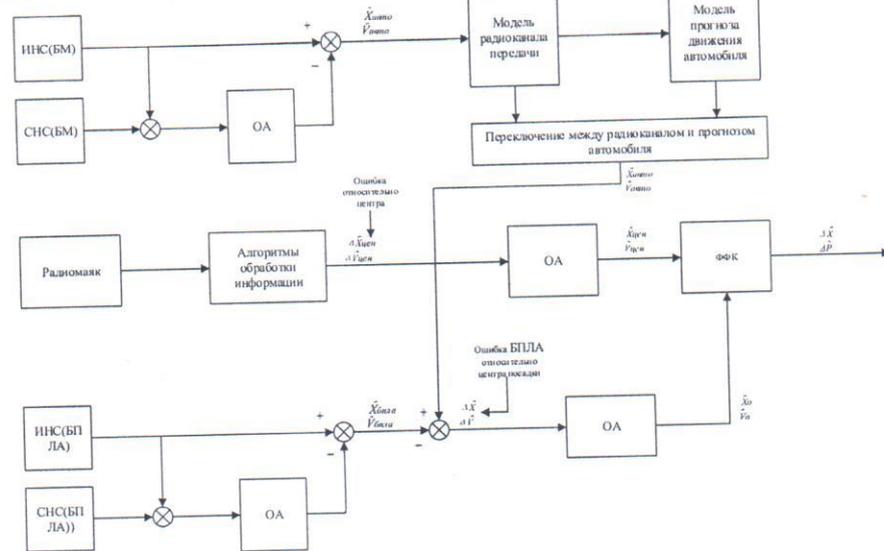


Рис.5. Схема навигационного комплекса

где,  $\Delta\hat{X}, \Delta\hat{P}$  – оценки погрешностей,  $\bar{X}_1, \bar{V}_1$  – Оценка состояния и скорости подфильтра 1,  $\bar{X}_2, \bar{V}_2$  – Оценка состояния и скорости подфильтра 2, ФФК – Федеральный фильтр Калмана, АО – алгоритм оценивания.

Фактически комплекс работает в двух режимах – слежения (БИНС + ГНСС) и посадки (радиомаяки) и может сам перейти из одного режима в другой в зависимости от оценки положения БЛА относительно точек посадки.

Первый этап задачи называется режимом слежения. В режиме слежения навигационный комплекс использует данные инерциальной навигационной системы и спутниковой навигационной системы для управления летательным аппаратом на подлете к движущейся посадочной платформе. На этом этапе БЛА продолжает приближаться к посадочной платформе по вертикали и горизонтали. При соответствии расчетного положения БЛА относительно посадочной площадки требованиям посадки навигационный комплекс автоматически переходит в режим посадки. В этой задаче осуществляется переход навигационной системы из режима сопровождения в режим посадки при высоте БЛА относительно посадочной платформы менее 5 метров.

Второй этап задачи называется режимом посадки. В режиме посадки НК использует информацию, измеренную системой маяков, для расчета относительного расстояния между БЛА и центром посадки, и эта информации используется для управления летательным аппаратом при посадке. На этом этапе БЛА сначала удерживает высоту полета неизменной и находится близко к центру посадки в горизонтальном положении, а когда навигационный комплекс определяет, что БЛА соответствует условиям посадки, он сохраняет горизонтальное положение беспилотного летательного аппарата. Летательный аппарат находится непосредственно над посадочной платформой, в то время как высота беспилотного летательного аппарата постоянно снижается, и, наконец,

осуществляется посадку на мобильную платформу.

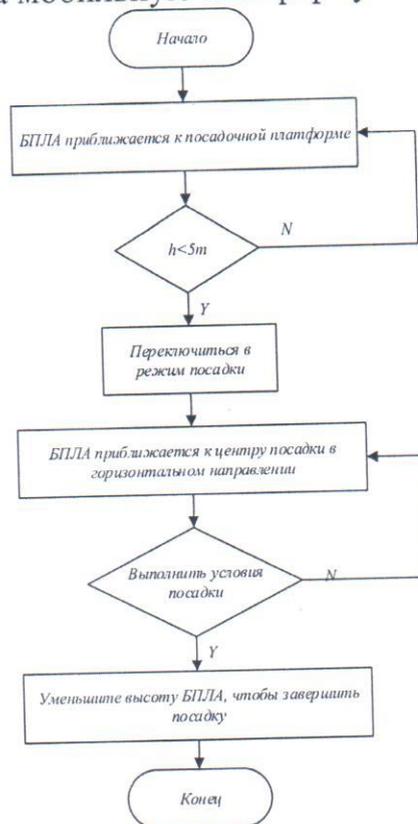


Рис.6. Схема работы навигационного комплекса

**Алгоритмы оценивания и фильтрации с забыванием.** Во время полета будем считать, что ускорение БЛА остается постоянным в момент времени  $[k-1, k]$ , можно использовать модель вида:

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{k-1} \quad (6)$$

Где  $p$  - положение БЛА,  $v$  - скорость БЛА.

Предполагая, что шумы системы являются некоррелированным последовательностям гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей, ковариационная матрица шума  $Q_{k-1}$  равна

$$Q_{k-1} = \text{diag} \{ \sigma_{px}, \sigma_{py}, \sigma_{pz}, \sigma_{vx}, \sigma_{vy}, \sigma_{vz} \}$$

На этапе оценивания по значению в момент времени  $k-1$  оценивается априорное оценочное значение системы  $X_{k/k-1}$  и соответствующая матрица ковариации ошибок

$$P_{k/k-1}$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k/k-1} &= \Phi_{k/k-1} X_{k-1} \\ P_{k/k-1} &= \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k/k-1} P_{k-1} \Gamma_{k/k-1}^T \end{aligned}$$

Расчетное значение корректируется в соответствии со значением систематического наблюдения  $Z_k$ , и получается апостериорная оценка системы  $X_k$  и соответствующая матрица ковариации ошибок  $P_k$ . На практике статистические характеристики не всегда надежны. Поэтому для оценки использован адаптивный

алгоритм:

$$K_k = P_{k/k-1} * H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$e_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1})$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}$$

$$d_k = \frac{(1-b)}{(1-b^{k+1})}$$

$$\hat{Q}_k = (1-d_k) \hat{Q}_{k-1} + d_k (K_k e_k e_k^T K_k^T + P_k - \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T)$$

$$\hat{R}_k = (1-d_k) \hat{R}_{k-1} + d_k (e_k e_k^T - H_k P_{k/k-1} H_k^T);$$

Где  $b$  - коэффициент забывания, обычно  $0 < b < 1$ , обычно диапазон его значений составляет 0.95-0.99.

Учитывая сложность задачи, рассмотрена структура фильтрации на основе объединенного фильтра Калмана для реализации интеграции информации ИНС-ГНСС и информации радиомаяков в процессе посадки.

**Система посадки БЛА на подвижное основание с использованием радиомаяков ближнего действия.** В системе маяки располагаются по определенным правилам, как показано на рис.7.

На мобильной платформе каждый маяк устроен по определенной пространственной структуре. Обычно мы предполагаем, что четыре маяка на границе расположены в виде квадрата  $l * l$ , расстояние по высоте от посадочной платформы равно  $l_3$ , а центральный маяк расположен на точке приземления, чтобы отметить центральную точку приземления.

В системе маяки располагаются по определенным правилам, как показано на следующем рисунке.

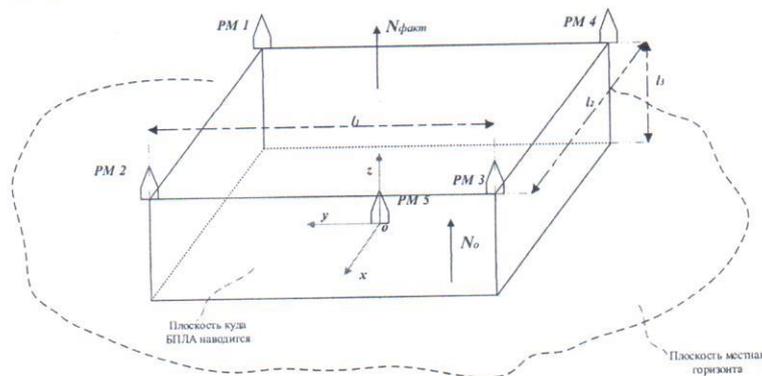


Рис. 7 Система радиомаяков ближнего радиуса действия

При переходе БЛА в режим посадки и в процессе посадки необходимо удерживать БЛА в разумной дальности от платформы, поэтому необходимо определить граничную дальность зоны посадки БЛА.

Так как посадочная площадка, образованная пограничным маяком, представляет собой квадрат с длиной стороны  $l$ , для обеспечения того, чтобы БЛА всегда оставался над посадочной площадкой в процессе посадки, расстояние между БЛА и центральным маяком в горизонтальном направлении должно быть меньше половины  $l$ . Тогда граница конечной зоны посадки БЛА представляет

собой круг, который принимает центральный маяк за центр и  $\frac{1}{2}l$  за радиус.

На этой основе продолжаем вводить новое значение измерения радиомаяка, после чего получаем информацию о местоположении БЛА в трехмерном пространстве. Из-за шума измерения пересечение кругов является не точкой, а областью, содержащей истинное положение БЛА.

Тогда можно перейти к следующему уравнению.

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + \varepsilon_i = R_i + \varepsilon_i, \quad (7)$$

где  $R_i$  — истинное расстояние между БЛА и маяком;  $\varepsilon_i$  — погрешность измерения. На основе этого метода, используем метод наименьших квадратов для получения алгоритма позиционирования БЛА в центре зоны посадки.

Преобразуем нелинейную систему уравнений (7) в линейную  $Ax = b$  и упростим ее, чтобы получить:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (8)$$

Где

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} r_1^2 - r_2^2 + (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ r_1^2 - r_2^2 + (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ r_1^2 - r_2^2 + (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \end{bmatrix}$$

$$x = [x, y, z]^T$$

Для повышения точности позиционирования рассмотрим метод взвешенных наименьших квадратов

В конце можно сказать, что вычисляемые ошибки относительно центра используются в БЛА для формирования управления. Введем весовую матрицу  $W$ , основанную на методе наименьших квадратов. Получил:

$$x^* = (A^T W A)^{-1} A^T W b$$

Матрица весов определяется следующим методом. Поскольку матрицу  $b$  можно получить

$$\psi_i = r_1^2 - r_i^2 + (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)$$

Здесь предполагается

$$r_1^2 - r_i^2 = (R_1 + \varepsilon_1)^2 - (R_i + \varepsilon_i)^2 \approx R_1^2 - R_i^2 + 2R_1\varepsilon_1 - 2R_i\varepsilon_i$$

Итак

$$\psi_i \approx 2R_1\varepsilon_1 - R_i\varepsilon_i$$

$$\psi_i \approx 2R_1\varepsilon_1 - 2R_i\varepsilon_i$$

Так как каждый шум радиомаяка не зависит друг от друга, получаем

$$E(\psi_i \psi_j) = 0, i \neq j$$

Таким образом, получается ковариационная матрица шума

$$Q = E(\psi \psi^T)$$

В практических приложениях, поскольку реальное расстояние неизвестно, мы используем  $r_i$  для представления  $R_i$  и вычисляем  $\psi$ , чтобы получить весовую матрицу  $W$ .

Таким образом, в главе представлены алгоритм адаптивного фильтра Калмана, основанный на факторе забывания, и объединенный фильтр Калмана, основанный на распределенной структуре. Приведен алгоритм коррекции интегрированной навигационной системы ИНС/ГНСС/СШП на основе федеративного фильтра Калмана. Использован НК с интеллектуальной компонентой осуществляющий коррекцию ошибок при приземлении БЛА на БМ.

Рассмотрена адаптивная навигационная система БЛА на основе радиомаячной системы. Предложена общая структура навигационного комплекса. Предложена структура НК БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего действия в различных режимах работы.

Представлена структура автономной системы посадки на основе системы радиомаяков. Предложен алгоритм спуска, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов. Предлагаемый способ обеспечивает выполнение задачи по посадке БЛА на подвижную платформу.

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования для проверки эффективности и работоспособности предложенных алгоритмов.

В процессе моделирования полета траектории движения БЛА и БМ показаны на Рис. 4.1. Координаты стартовой позиции БЛА  $[0,0,41]$ , начальная скорость  $[0,0.2,0]$ , начальное ускорение  $[0,0,0]$ . Координаты стартовой позиции БМ  $[0,0,1]$ , начальная скорость  $[0,0.2,0]$ , начальное ускорение  $[0,0,0]$ .

#### 1. Результаты моделирования интегрированной навигации INS/GNSS

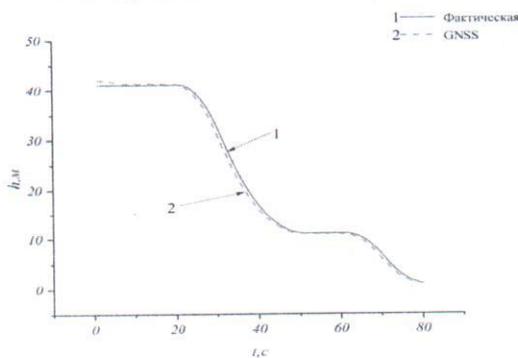


Рис.8 Траектория движения по оси

Z

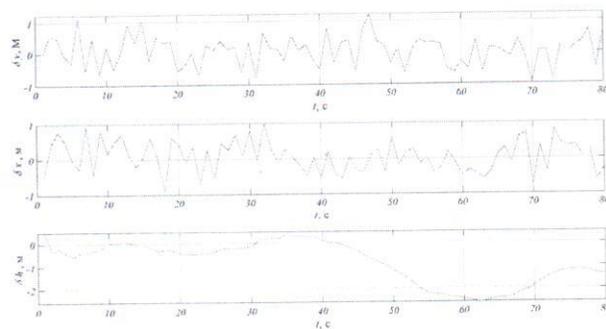


Рис.9 Погрешности оценки

#### 2. Результаты моделирования интегрированной навигации INS/UWB

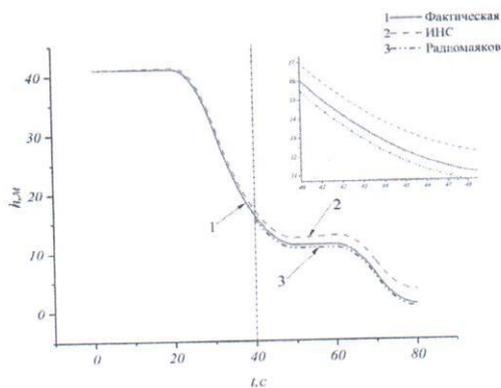


Рис.10 Траектория движения по оси Z

3. Результаты моделирования интегрированной навигации INS/GNSS/UWB на основе федерального фильтра Калмана.

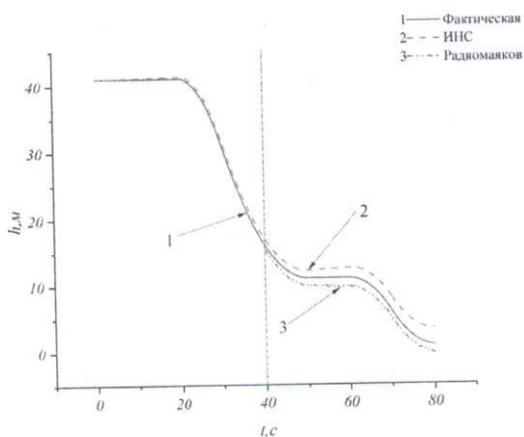


Рис.12 Траектория движения по оси Z

4. Результаты моделирования адаптивного навигационного комплекса БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего действия.

На рис.13 показано изменение высоты БЛА. Изменение высоты БЛА показано на рисунке 13. Экспериментальные результаты показывают, что БЛА может завершить посадку.

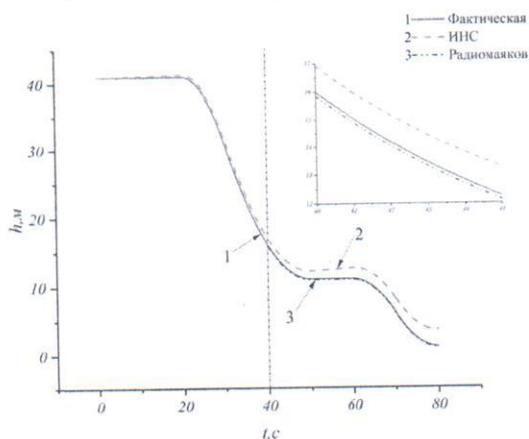


Рис.14 Траектория движения по оси Z

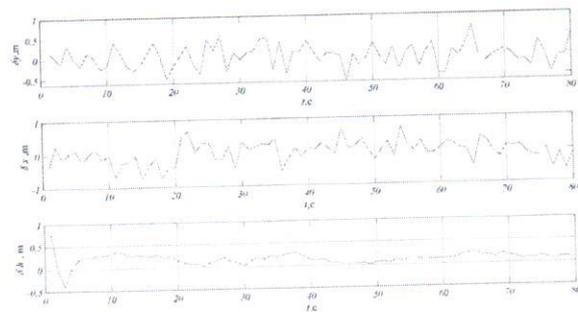


Рис.11 Погрешности оценки

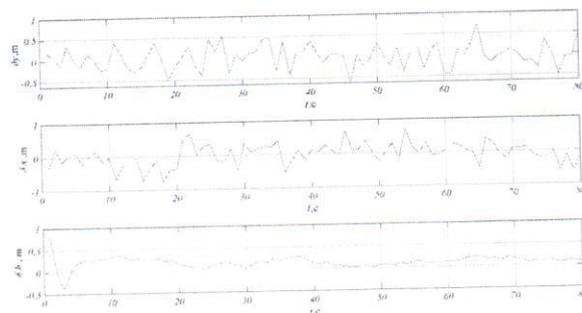


Рис.13 Погрешности оценки

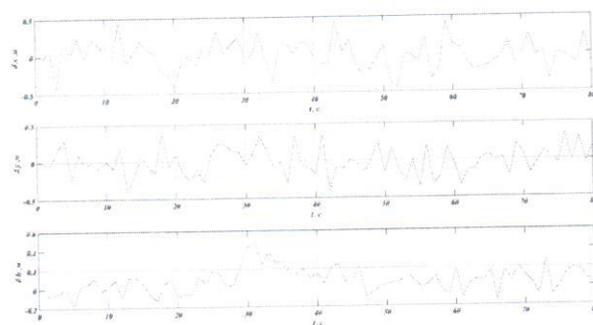


Рис.15 Погрешности оценки

На рис. 15 показана расчетная погрешность расстояния между БЛА и центром посадки в процессе посадки БЛА, из нее видно, что максимальное значение расчетной погрешности за весь процесс посадки составляет менее 0.5 м. Эта точность оценки отвечает требованиям посадки БЛА на движущуюся платформу и может реализовать задачу посадки БЛА на мобильную платформу.

Таблица 1.

Точностные характеристики НК

Алгоритмы НК	Точность НК		
	Ошибка определения местоположения, м	Ошибка определения скорости, м/с	Объем памяти, кБ
Автономная ИНС	4,5-5,5	0.4-0.5	5 к
ИНС+ГНСС	1,2-1,5	0.10	10 к
ИНС+СПШ	0,6-1.0	0.0.9	12 к
ИНС+ГНСС +ФФК	0,5-0,0.7	0.06	20 к
ИНС+ГНСС +АФК+БКС	0.4-0.5	0.05	18 к

В табл. 1 приведены средние значения по результатам математического моделирования с тестовой моделью с различными возможными случайными возмущениями. Моделирование проведено во время 80 с.

Результаты натурного эксперимента с автомобилем подтвердили эффективность разработанных алгоритмов оценивания.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана система посадки БЛА на подвижное основание с использованием радиомаяков, отличающаяся от известных простотой реализации.
2. Разработана Функциональная схема НК БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего радиуса действия, обеспечивающей помехозащищенность работы БЛА и БМ.
3. Разработан метод коррекции НК на основе адаптивного фильтра Калмана, с фактором забывания и распределенной структурой. По сравнению с аналогом точность алгоритма увеличена в среднем на 5-8%.
4. Разработан алгоритм коррекции НК с интеллектуальной компонентой в составе ИНС/ГНСС/СПШ на основе федеративного фильтра Калмана. По сравнению с прототипом точность коррекции повышается в среднем на 9-12%.
5. Разработан алгоритм спуска БЛА на подвижную БМ, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов. Отличающийся простотой реализации на борту БЛА.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Чжан С., Масленников А.Л., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Адаптивный навигационный комплекс БЛА с коррекцией от радиомаяков ближнего действия//

- Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. №9, С. 30 - 36(0.8 п.л. / 0,34 п.л.), **к 1**.
2. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Чжан С., И Цз. Исследование навигационных комплексов с интеллектуальными компонентами// Авиакосмическое приборостроение. 2019. №12, С. 3-11. (1.04 п.л. / 0,4 п.л.), **к 2**.
3. Чжан С., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Ван Ц. Исследования коррекции интегрированной навигационной системы при отсутствии спутникового сигнала// Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т.75, №11, С. 510 – 515 (0.69 п.л. / 0,23 п.л.), **к 2**.
4. Задорожная Н.М., Чжан С. Регулятор с эталонной моделью для управления беспилотным летательным аппаратом при посадке на беспилотный автомобиль// Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т.76, №2, С. 73-77(0.58 п.л. / 0,19 п.л.), **к 2**.
5. Кузнецова А.Д., Чжан С., Исследование задачи посадки конвертоплана на платформу беспилотного автомобиля// Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т.76, №12, С. 560-570 (1.27 п.л. / 0,41 п.л.), **к 2**.
6. Масленников А.Л., Чжан С., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Система посадки БЛА на подвижное основание с использованием радиомаяков ближнего действия// Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т.77, №7, С. 224 - 228. (0.578 п.л. / 0,37 п.л.), **к 2**.
7. Чжан С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Коррекция автономных инерциальных навигационных систем летательных аппаратов// Инженерная физика. 2020. №1, С. 68-75. (0.92 п.л. / 0,3 п.л.)
8. Zhang X., Proletarsky A.V., Selezneva M.S. Implementation method of rendezvous process of unmanned aerial vehicle landing on the mobile unmanned vehicle // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. 2022. p. 23-27 (0.578 п.л. / 0,47 п.л.).
9. Чжоу Ж., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Чжан С. Алгоритм движения при посадке беспилотного летательного аппарата на автомобиль// 2020 XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. IEEE. 2020. p. 73-75 (0.35 п.л. / 0,23 п.л.).
10. Чжан С. Алгоритмические методы коррекции гирорвертикали малогабаритного беспилотного летательного аппарата// Будущее машиностроения России. 2019. С. 873-876(0.46 п.л. / 0,13 п.л.).
11. Чжоу Ж., Рязанова Н.Ю., Чжан С., Алгоритм посадки беспилотного космического летательного аппарата // Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных-пионеров освоения космического пространства. 2021. С. 374-376 (0.35 п.л. / 0,08 п.л.).
12. Рязанова Н.Ю., Чжан С., Кузнецова А.Д. Посадка конвертоплана на платформу беспилотного автомобиля с применением инфракрасной камеры // Будущее машиностроения России. 2022. С. 370-373 (0.462 п.л. / 0,2 п.л.).