

На правах рукописи

ФАМ СУАН ЧЫОНГ

**АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ И КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

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»

Шелагурова Марина Сергеевна

Кандидат технических наук, доцент, начальник
отдела АО «Раменского приборостроительного
конструкторского бюро»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Защита состоится «15» июня 2021 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете имени 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 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 «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Муратов
Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение задач мониторинга больших пространств и поверхностей Земли и океана, доставки полезной нагрузки в заданную точку и другие сложные задачи осуществляется с помощью высокоточных беспилотных летательных аппаратов (БЛА). БЛА исследуемого класса осуществляют полеты в атмосфере на высотах до 25 тыс. км., а также предусмотрена фаза полета по рельефу местности. Управление такими БЛА является наиболее сложным из-за высоких требований к точности управления. Системы управления ЛА вырабатывают сигналы управления на основе измерительной информации от различных навигационных систем. Навигационные системы имеют погрешности и для повышения точности навигационных определений их объединяют в навигационные комплексы (НК). Как правило, базовой системой в НК является инерциальная навигационная система (ИНС), а в качестве внешней по отношению к ИНС системы используют: спутниковые навигационные системы (GPS, ГЛОНАСС), разнообразные радиолокационные системы (РЛС), астросистемы (АИС) и др.

Измерительные сигналы этих систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования БЛА, в частности пассивными помехами. Наиболее распространенная схема алгоритмической коррекции навигационных систем и НК предусматривает совместную обработку сигналов от ИНС и внешнего датчика с помощью алгоритма оценивания.

Алгоритмы оценивания применяются для компенсации погрешностей в выходном сигнале НК.

Большой вклад в создание современных НК и их алгоритмического обеспечения внесли Агеев В.М., Бабиченко А.В., Джанджава Г.И., Парусников Н.А., Селезнева М.С., Сотников В.И., Харин Е.Г., John W. Gichton, Lance Sherry, Giarratano Joseph C., Piley Gary D. Требования, предъявляемые к точности НК высокоточных БЛА, постоянно возрастают, поэтому разработка новых технических решений и схем коррекции, алгоритмов обработки информации являются актуальными и важными задачами.

Точность алгоритмической коррекции в большой степени зависит от характеристик ИНС и внешних датчиков навигационной информации, от достоверности априорной информации о объекте оценивания, его стохастических характеристиках, а также от способа комплексирования систем в НК.

Алгоритмическое обеспечение высокоточных НК включает нелинейные алгоритмы оценивания, в частности нелинейный фильтр Калмана (НФК), адаптивные модификации НФК позволяют получить высокую точность навигационных определений выбранного состава НК. Большой вклад в разработку адаптивных НФК внесли Афанасьев В.Н., Дишель В.Д., Степанов О.А., Шахтарин Б.И., Шэнь Кай и др.

НФК достаточно сложны в реализации в вычислителе БЛА, поэтому часто используются линейные адаптивные фильтры Калмана (АФК).

Дальнейшее повышение точности НК возможно путем выбора наилучшего состава НК в зависимости от режима полета и помеховой обстановки, что обеспечит максимально точное определение навигационных параметров БЛА.

Разработка алгоритмов коррекции направленных на компенсацию остаточных погрешностей (после проведенной коррекции) НК также является актуальной задачей при разработке высокоточных БЛА.

Объект исследования. В качестве основного объекта исследования в диссертации рассматриваются НК включающие ИНС, СНС, АИС, РЛС и алгоритмы обработки информации, применяемые в высокоточных БЛА.

Целью работы является разработка и исследование алгоритмов комплексирования и коррекции навигационных систем высокоточных БЛА, функционирующих в условиях различной помеховой обстановки.

Задачи исследования:

1. Разработка алгоритмов компенсации динамических погрешностей астро-инерциальной навигационной системы (АИНС).
2. Разработка структур и алгоритмов обработки информации навигационных комплексов высокоточных БЛА.
3. Разработка алгоритмов коррекции ИНС на основе сигналов с АИС.
4. Формирование методики выбора информационного поля при управлении БЛА при полете по маршруту.
5. Синтез критериев выбора рабочего контура НК в процессе полета БЛА.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Осуществлен выбор вариантов структур НК на основе комбинации навигационных систем в зависимости от помеховой обстановки: НК в составе ИНС, СНС и АИС, а в условиях значительных помех – НК в составе ИНС и РЛС.
2. Разработан алгоритм и предложена схема коррекции динамических погрешностей АИНС на основе формализованных связей погрешностей с доминирующими возмущениями, позволяющие компенсировать динамические погрешности с использованием линейного АФК. Сформированы измерения для АО как функции возмущающих факторов, действующих на АИНС.
3. Разработана методика выбора используемого в НК информационного поля и навигационных систем НК для проведения коррекции ИНС с учетом условий функционирования БЛА. Формирование методики выбора информационного поля при управлении высокоточными БЛА при полёте по маршруту. Предложена методика формирования эталонов для алгоритмов распознавания.

4. Предложены критерии формирования динамического рабочей структуры НК в процессе полёта БЛА в меняющейся помеховой обстановке, позволяющие упростить решение. Критерии базируются на анализе оценок дисперсий приведённых измерительных шумов.

Практическая значимость результатов исследования.

Разработана схема коррекции АИНС, включающая АНФК. Особенностью предложенной схемы является компенсация нарастания угла отклонения гиростабилизированной платформы (ГСП) от сопровождающего трехгранника с

помощью нелинейного регулятора. Нелинейный регулятор реализован с использованием: state dependent coefficient (SDC) – представления модели.

Выбор наилучшего приборного состава НК в процессе полета позволил определять навигационные параметры БЛА с максимальной возможной точностью. Дальнейшее повышение точности НК осуществлено с помощью применения разработанных алгоритмы высокоточной коррекции навигационной информации. В условиях пассивных помех осуществляется изменение приборного состава НК на основе разработанного способа комплексирования систем, который базируется на анализе прогноза погрешностей систем НК в процессе полета БЛА. Для априорного выбора состава НК БЛА разработана методика, предполагающая анализ используемых информационных полей и зависящая от высоты полета.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов подтверждены корректным использованием математических методов, моделей и алгоритмов, а также достаточным объемом численного моделирования и полученными непротиворечивыми результатами, которые согласуются с известными данными, опубликованными в открытой печати.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации использованы в учебном процессе на кафедре систем автоматического управления факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках дисциплины «Управление в технических системах».

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, системного анализа, навигационных систем, методы математического моделирования и программный пакет MATLAB.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Схемы коррекции и алгоритмическое обеспечение АИНС высокоточного БЛА, базирующееся на НФК, а также АФК и формализованных зависимостях динамических погрешностей АИНС.

2. Структуры НК, основанные на анализе информационных полей, прогнозе погрешностей внешних навигационных систем.

3. Методика выбора информационных полей при полете БЛА по маршруту.

4. Критерии выбора рабочего контура НК в процессе полета на основе анализа оценок дисперсий измерительных шумов и приведенных измерительных шумов.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах: научно-технической конференции «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы» (Москва, 2019); всероссийской студенческой конференции «Студенческая научная весна», посвященной 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Москва, 2018); XXVII Санкт-Петербургской конференции по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2020); Всероссийской конференции «Будущее машиностроения» (Москва, 2018, 2019); International Russian Automation

Conference (RusAutoCon), IEEE (Сочи, 2020); научном семинаре кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019, 2020, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 7 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 2 статьи, индексируемые в базе Scopus, объемом 9,9 п.л./ 6,46 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 125 машинописных страницах, содержит 43 рисунка. Список литературы включает 83 наименования работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены типы БЛА и подробно исследованы типы высокоточных БЛА, которые отличаются высокой стоимостью и высокими требованиями к точностным характеристикам НК. Рассмотрены навигационные системы в составе НК, их погрешности и особенности функционирования.

Представлены РЛС, СНС, ИНС, БИНС и АИС. В зависимости от условий функционирования для определения навигационных параметров высокоточных БЛА используют ИНС, АИС и СНС. Различные способы их коррекции осуществляются в частности посредством алгоритмов оценивания. Алгоритмы оценивания предполагают использование математических моделей погрешностей базовой навигационной системы. В качестве базовой системы в НК обычно используют ИНС, поэтому подробно представлены нелинейная и линейная модели погрешностей ИНС.

Для высокоточного определения навигационных параметров БЛА в условиях отсутствия пассивных помех используют АИНС. При появлении пассивных помех, что обычно проявляется на участках низковысотного полета состав НК меняется и включает ИНС и РЛС. В этом случае обработку информации в НК целесообразно проводить с помощью линейных алгоритмов оценивания. Для повышения точности навигационных определений высокоточного БЛА целесообразно использовать алгоритмическую коррекцию. В связи с этим обстоятельством и была сформулирована постановка задачи диссертационного исследования – разработки алгоритмов высокоточной коррекции навигационных систем и НК БЛА в условиях различной помеховой обстановки.

Вторая глава посвящена исследованию схем комплексирования навигационных систем, которые применяются для определения параметров высокоточных БЛА. Рассмотрены схемы алгоритмической коррекции автономных ИНС с использованием только внутренней информации системы. Исследованы схемы коррекции ИНС от различных датчиков внешней информации, корреляционно-экстремальные системы. Представлены классические схемы коррекции ИНС от СНС и АИС с использованием нелинейного фильтра Калмана. Приведены сравнительные точностные характеристики навигационных комплексов различного состава. Исследованы

перспективные схемы коррекции ИНС от СНС и АИС, которые используются в дальнейших исследованиях.

В третьей главе представлены алгоритмы коррекции ИНС от СНС и АИС.

Рассмотрены концептуальные способы повышения точности навигационной информации БЛА алгоритмическим путем.

Рассмотрен адаптивный НФК.

Модель погрешностей ИНС имеет вид:

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

где \mathbf{x}_k – вектор состояния; $\Phi_k(\mathbf{x}_{k-1})$ – нелинейная матрица модели. Часть вектора состояния измеряется:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где \mathbf{z}_k – вектор измерений; \mathbf{H}_k – матрица измерений; \mathbf{w}_k и \mathbf{v}_k – дискретные аналоги гауссовского белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций \mathbf{Q}_k и \mathbf{R}_k .

Уравнения НФК имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) [\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}], \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} &= \Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \\ \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) &= \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}, \\ \mathbf{P}_{k,k-1} &= \frac{\partial \Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T} \mathbf{P}_{k-1} \left[\frac{\partial \Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T} \right]^T + \mathbf{Q}_k, \\ \mathbf{P}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь: $\mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$ – матрица усиления фильтра Калмана.

Адаптивный НФК снабжен генетическим алгоритмом (ГА) и индикатором расходимости. ГА использован для построения модели оцениваемого процесса, которая используется в качестве эталонной модели для обеспечения адекватности с реальным процессом изменения погрешностей ИНС.

Индикатором расходимости процесса оценивания реализован на основе неравенства Рао-Крамера.

Разработана схема коррекции АИНС, включающая АНФК. Особенностью предложенной схемы является компенсация нарастания угла отклонения ГСП от сопровождающего трехгранника с помощью нелинейного регулятора. При функционировании ИНС на длительных интервалах времени без коррекции углы отклонения ГСП нарастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. В этом случае применяют коррекцию ИНС в структуре системы посредством алгоритмов управления. С целью повышения точности навигационных определений БЛА, в НК использован нелинейный алгоритм управления, базирующиеся на SDC – представлении нелинейной модели погрешностей ИНС.

Рассмотрена АИНС БЛА, состоящая из АИС, установленной на ГСП ИНС. Исследованы погрешности АИНС, возникающие из-за различных

возмущающих факторов. Разработаны способы уменьшения погрешностей с помощью формирования каналов коррекции АИНС и использования АФК.

Реакция АИНС на приведенную систематическую скорость дрейфа горизонтального гироскопа:

$$\Delta y_n(t, \Delta \omega_{gp}^*) = \frac{R \omega_0 \omega_{gp}^*}{\sqrt{(k_{31} - \omega_0^2) + k_3^2 \omega_0^2}} \sin\left(\omega_0 t + \arctg \frac{k_3 \omega_0}{k_{31} - \omega_0^2}\right) + S_\omega(t), \quad (4)$$

где: $S_\omega(t)$ – сумма затухающих членов; ω_{gp} – систематическая приведенная скорость дрейфа ГСП; R – расстояние от центра масс Земли до центра масс высокоточных БЛА (точнее до точки подвеса ГСП); Δy_n – погрешности АИНС в счислении пути; $\frac{g}{R} = \omega_0^2$ – ускорение силы тяжести; k_3 – коэффициент усиления в канале астрокоррекции; k_{31} – коэффициент интегральной коррекции.

Изложенный способ коррекции в структуре АИНС позволяет уменьшить погрешности АИНС.

Наибольшее влияние на точность АИНС оказывает систематический дрейф гироскопов. Полученные зависимости использованы для коррекции АИНС. Более полную компенсацию погрешностей АИНС осуществляют с помощью АФК.

Наиболее точная навигационная информация о параметрах БЛА определяется с помощью комплексирования ИНС, СНС и АИС. Представлены четыре функциональные схемы комплексирования этих систем. Функциональная схема НК с автоматическим выбором рабочего контура представлена на Рис. 1.

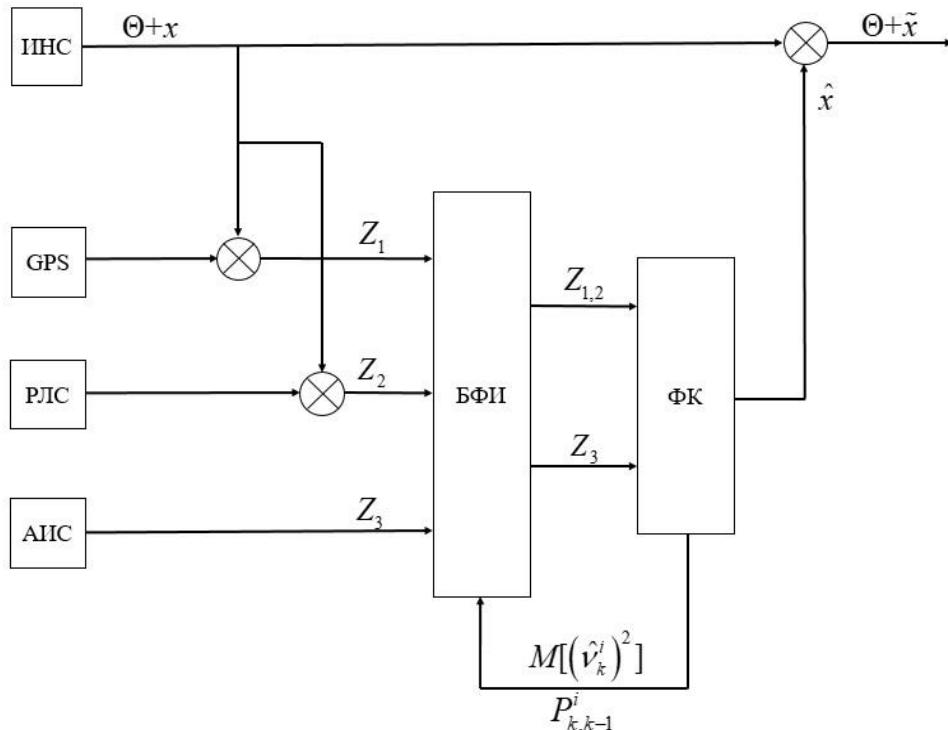


Рис. 1. Структура навигационного комплекса высокоточного беспилотного летательного аппарата

На Рис. 1 введены следующие обозначения: Θ – истинная навигационная информация о навигационных параметрах высокоточных БЛА; x – погрешности ИНС; \hat{x} – оценка погрешностей ИНС; \tilde{x} – ошибка оценивания погрешностей ИНС; Z_1 – смесь погрешностей ИНС и GPS; Z_2 – совокупность погрешностей ИНС и РЛС; $Z_{1,2}$ – совокупность погрешностей навигационных систем, выбранных в зависимости от высоты полёта БЛА; Z_3 – сигнал АИС; БФИ – блок формирования измерений для фильтра Калмана; ФК – фильтр Калмана.

В алгоритмическом обеспечении НК используются ФК или его адаптивные модификации. Рассмотрена модель, описывающая изменения погрешностей ИНС, вида:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (5)$$

где: x_k – вектор состояния, состоящий из погрешностей ИНС; Φ – матрица модели; w_k – вектор входного возмущения.

Входные возмущения предполагаются г-мерным дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием. $M[W_j W_k^T] = Q_k \delta_{j,k}$, где Q_k – неотрицательно определённая матрица; $\delta_{j,k}$ – символ Кронекера.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_{k+1} = H x_{k+1} + V_{k+1}. \quad (6)$$

Здесь: z_{k+1} – вектор измерений; H – матрица измерений; V_{k+1} – вектор ошибок измерения, который предполагается дискретным аналогом гауссового белого шума. $M[V_{k+1}] = 0$; $M[V_j V_{k+1}^T] = R_{k+1} \delta_{j,k+1}$.

В практических приложениях достоверная априорная информация о статистических характеристиках входного и измерительных шумов неизвестна, поэтому вместо ФК в НК используются АФК. АФК, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной стохастической информации с жесткой обратной связью по обновляемой последовательности и имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi \hat{x}_{k-1} + K_k v_k, \\ v_k &= z_k - H \Phi \hat{x}_{k-1}, \\ P_{k/(k-1)} &= \Phi P_{k-1} \Phi^T + K_{k-1} v_k v_k^T K_{k-1}^T, \\ K_k &= \begin{cases} P_{k/(k-1)} H_k^T \left[M(v_k v_k^T) \right]^{-1} & \text{при } \text{diag} \left[M(v_k v_k^T) \right] > \text{diag} H_k P_{k/(k-1)} H_k^T, \\ P_{k/(k-1)} H_k^T \left[H_k P_{k/(k-1)} H_k^T \right]^{-1} & \text{при } \text{diag} \left[M(v_k v_k^T) \right] \leq \text{diag} H_k P_{k/(k-1)} H_k^T \end{cases}, \\ P_k &= (I - K_k H) P_{k/(k-1)}, \\ M(v_k v_k^T) &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (v_j v_j^T). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь: $P_{(k+1)/k}$ – априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; P_{k+1} – апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания; K_k – матрица усиления АФК; I – единичная матрица.

Четвертая глава исследован высокоточные БЛА при движении по заданному маршруту. В рамках заданной системы управления и с учетом логики ее работы построена система маршрутной коррекции, обеспечивающую приведение БЛА в заданную область пространства с требуемыми точностями.

На основе такого разбиения формируется решающая функция. В точке истинной гипотезы, соответствующей положению опорного объекта, решающая функция имеет экстремум (минимум либо максимум), а в остальных – нет. По положению этого экстремума можно определить, где находится опорный объект (Рис. 2).

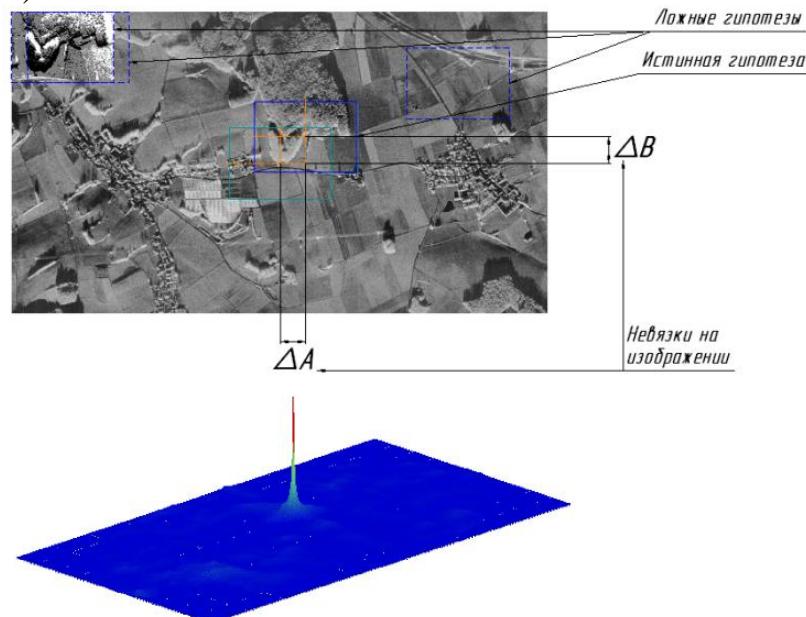


Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма селекции, основанного на силуэтном методе Савельева-Козко с видом построенной решающей функции

Проведен сравнительный анализ методов коррекции и обоснован выбор метода коррекции; проведен сравнительный анализ алгоритмов распознавания и обоснован выбор контурного алгоритма Савельева-Козко; разработана методика формирования эталонов для алгоритмов распознавания; разработан алгоритм выбора эталонов из базы данных.

Предложена структура НК, позволяющая изменять состав внешних навигационных систем априорно – при изменении высоты полета.

Разработан способ апостериорного изменения рабочего контура НК. Для определения рабочего контура НК сформированы специальные критерии на основе скалярного подхода. Разработан критерий, анализирующий оценки дисперсий измерительного шума и критерий, анализирующий оценки дисперсий приведенного измерительного шума, который имеет следующий вид:

$$\hat{r}_k^{i*} \leq \hat{r}_k^{j*}, \quad (8)$$

i -й рабочий контур НК; j -й рабочий контур НК.

$$\hat{r}_k^i = M \left[\left(\hat{g}_k^i \right)^2 \right] - p_{k,k-1}^i. \quad (9)$$

Дисперсия ошибки оценивания алгоритма оценивания имеет вид:

$$p_{k,k-1}^i = a_{ii}^2 p_{k-1}^i + \left(k_{k-1}^i \right)^2 \left(g_k^i \right)^2, \quad (10)$$

где: g_k^i – обновляемая последовательность в адаптивном скалярном алгоритме оценивания получена по формуле:

$$g_k^i = z_k^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{k-1}^i - s_{k-1}^i,$$

$$z_1^* = \begin{bmatrix} z_1^{*1} \\ z_1^{*2} \\ \dots \\ z_1^{*n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ HA \\ \dots \\ HA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix},$$

$$s_k^i = a_{i1} \hat{x}_{n(k-1)+1}^1 + a_{i2} \hat{x}_{n(k-1)+1}^2 + \dots + a_{in} \hat{x}_{n(k-1)+1}^n,$$

$a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ – i-я строка матрицы S^{-1} ; k_{k-1}^i – коэффициент усиления алгоритма оценивания.

Вычисленные таким образом оценки дисперсии измерительного шума используются в критерии выбора рабочего контура НК. Сравниваются оценки дисперсии измерительного шума для структуры НК, включающего ИНС и GPS, с оценкой дисперсии измерительного шума структуры ИНС с РЛС. По минимальному значению оценки выбирается рабочий контур НК.

Критерий сравнения оценок дисперсий приведенного шума позволяет выбрать рабочий контур НК с помощью которого можно получить наилучшие оценки погрешностей ИНС посредством АФК.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям. Проведено математическое моделирование погрешностей ИНС с различными алгоритмами коррекции. Представлены результаты моделирования по данным лабораторного эксперимента с системами ЦО60К и АИСТ–350.

Ошибки ИНС АИСТ–350 в определении скорости БЛА представлены на Рис. 3, где обозначено: 1 – ошибки ИНС в определении скорости; 2 – оценки ошибок ИНС при помощи адаптивного ФК. По серии экспериментов среднеквадратическое отклонение непосредственно измеряемой ошибки ИНС в определении скорости в среднем составляет 0,018 м/с, а угла отклонения ГСП – 6×10^{-7} рад.

Результаты моделирования НФК и адаптивного НФК представлены на Рис. 4, где 1 – измерение с реальной ИНС; кривая 2 – оценки при помощи НФК; 3 – оценки адаптивного НФК.

По серии экспериментов среднеквадратическое отклонение оценок углов отклонения ГСП на интервале времени 240 с в среднем составляет: при помощи НФК $1,4 \times 10^{-7}$ рад при помощи адаптивного НФК $3,5 \times 10^{-8}$ рад.

Адаптивный НФК показал наиболее высокую точность.

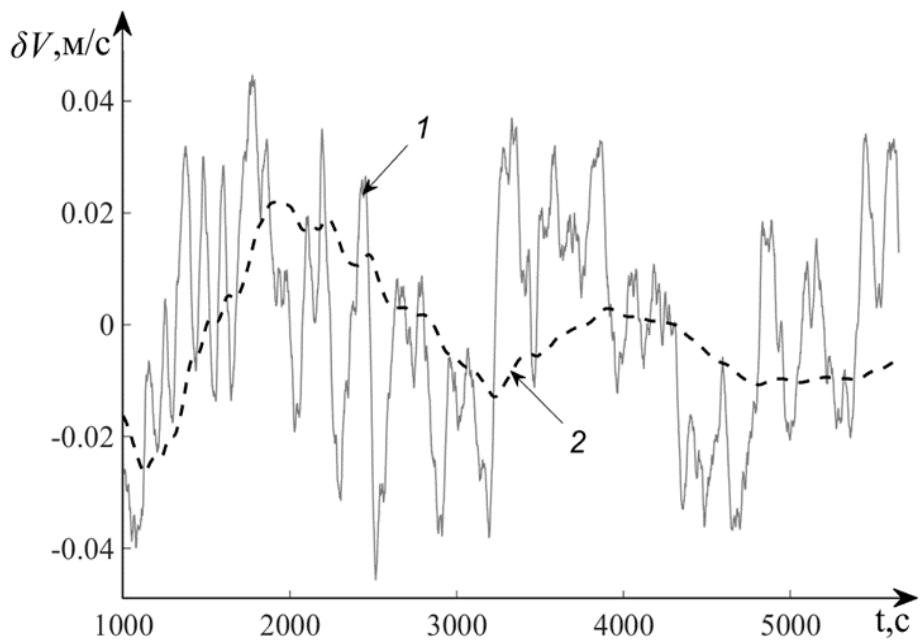


Рис. 3. Ошибки ИНС АИСТ-350 в определении скорости ЛА и оценки АФК

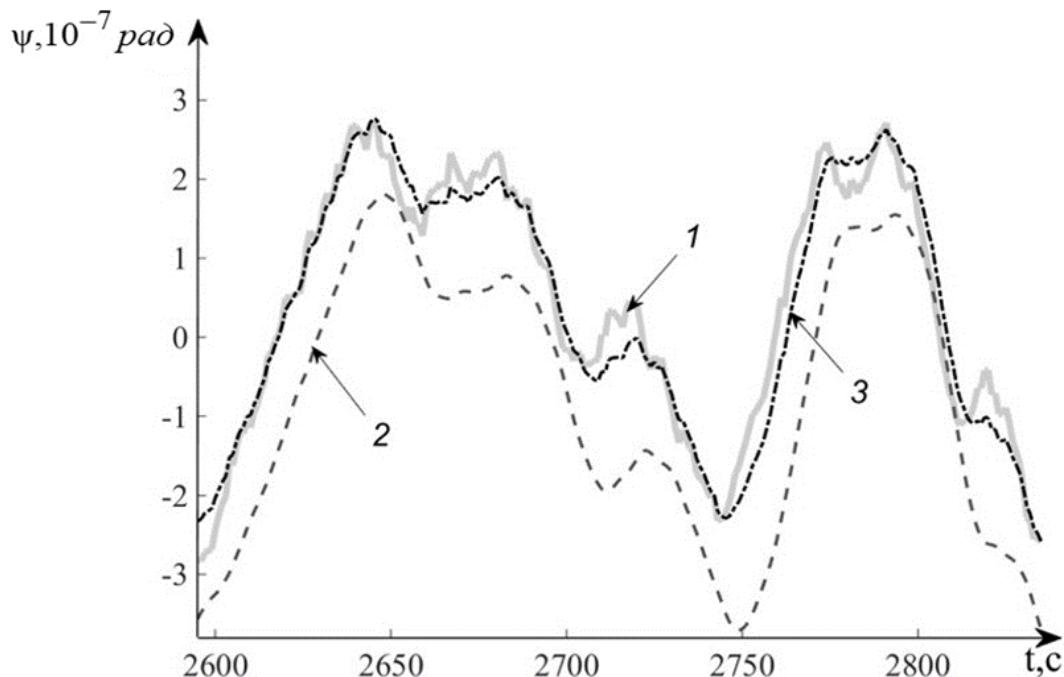


Рис. 4. Результаты моделирования НФК и АНФК

Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность и высокую точность разработанных алгоритмов. Анализ результатов математического моделирования показал, что разработанные алгоритмические решения позволяют повысить эффективность НК высокоточных БЛА. Моделирование по данным полунатурного эксперимента показали высокую точность АИНС. В условиях низковысотного полета применяется НК в составе ИНС и РЛС с линейным адаптивным алгоритмом оценивания. Результаты математического моделирования ИНС с РЛС подтвердили достаточно высокую точность маршрутной коррекции БЛА.

Погрешности ИНС в определении местоположения, полученные в ходе лабораторного эксперимента, необходимо сравнить с расчётными ошибками в определении широты и долготы, которые вычислены с помощью АФК.

Значения долготы, полученные в процессе эксперимента и ее оценки приведены на Рис. 5.

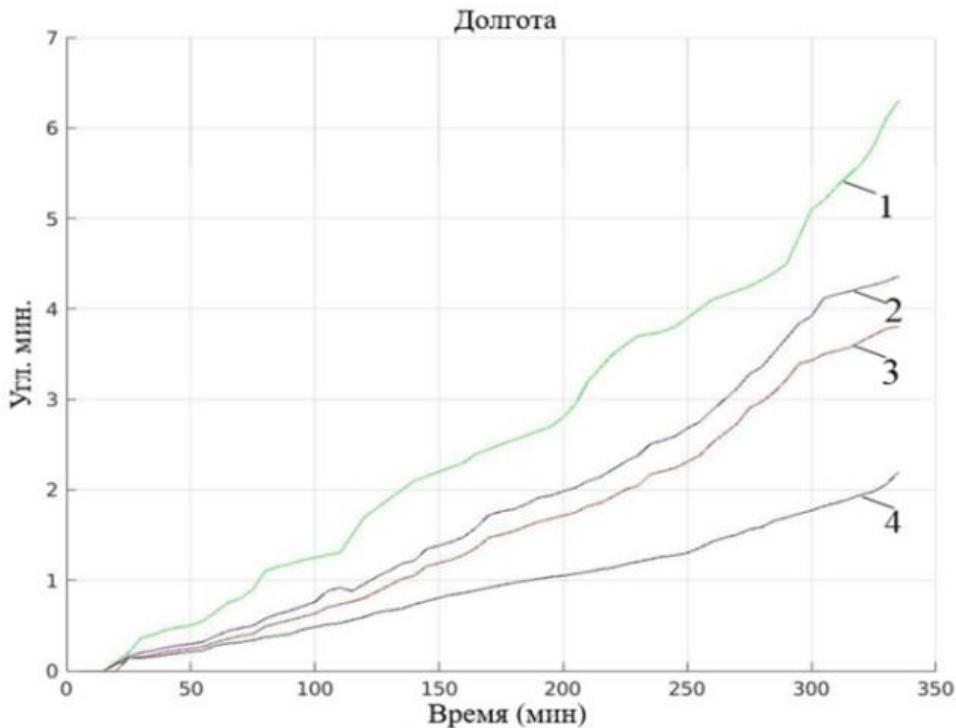


Рис. 5. Результаты моделирования по данным лабораторного эксперимента

На Рис. 5 приведены значения долготы и ее оценки АФК при использовании сигналов ГЛОНАСС, АИС и РЛС, где: 1 – реальные значения долготы, полученные в процессе эксперимента с реальной ИНС; 2 – оценка долготы, полученная с помощью АИНС; 3 – оценка долготы, полученная с помощью ИНС+ГЛОНАСС; 4 – оценка долготы, полученная с помощью ИНС+РЛС.

Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность и высокую точность разработанных алгоритмов. Анализ результатов математического моделирования показал, что разработанные алгоритмические решения позволяют повысить эффективность НК высокоточных БЛА. Использование формализованных зависимостей динамических погрешностей АИНС от различных возмущающих факторов позволяет компенсировать лишь часть ошибок в вычислении навигационных определений и повысить точность НК. Моделирование по данным полунаатурального эксперимента показали высокую точность разработанных алгоритмических решений.

При проведении моделирования уровень помех увеличивался в три раза, а при моделировании аномальных помех измерительный шум увеличивался в десять раз.

Точность коррекции НК с помощью линейного АФК приведены в Таблице. 1.

Таблица. 1.

Точность коррекции НК с помощью линейного АФК

Состав НК	Точность коррекции	Точность коррекции при увеличенном уровне помех	Точность коррекции при аномальных помехах
ИНС+РЛС	70%	67%	64%
ИНС+СНС	75%	72%	66%
АИНС	80%	75%	—
ИНС+СНС+АИС	88%	74%	66%
НК с критерием выбора состава	89%	74%	66%

Точность коррекции НК с помощью АНФК приведены в Таблице. 2.

Таблица. 2.

Точность коррекции НК с помощью АНФК

Состав НК	Точность коррекции	Точность коррекции при увеличенном уровне помех	Точность коррекции при аномальных помехах
ИНС+РЛС	72%	68%	60%
ИНС+СНС	78%	73%	64%
АИНС	81%	78%	—
ИНС+СНС+АИС	90%	84%	64%

В условиях аномальных измерений в АИНС коррекция не проводится и точность НК определяется погрешностями автономной ИНС.

В условиях низковысотного полета применяется НК в составе ИНС и РЛС с линейным АФК. Результаты математического моделирования ИНС с РЛС подтвердили достаточно высокую точность маршрутной коррекции высокоточных БЛА.

Моделирование показало, что наилучшие результаты коррекции погрешностей АИНС в определении долготы получены с помощью АНФК. Представленный способ коррекции в структуре АИНС позволяет уменьшить углы отклонения ГСП и тем самым повысить точность АИС.

Проведено математическое моделирование АФК и АНФК. Результаты моделирования продемонстрировали высокую точность оценивания

погрешностей ИНС с СНС и АИНС. В случае изменения уровня помех разработанный критерий выбора рабочего контура НК позволяет использовать наилучшую конфигурацию НК.

Проведено моделирование по данным лабораторного эксперимента с реальными системами. Оценка точности использованных алгоритмов оценивания проведена с помощью известной методики обработки экспериментальных данных. Результаты моделирования продемонстрировали высокую точность оценивания погрешностей АИНС с СНС с помощью АНФК. При использовании более простого в реализации линейного АФК наилучшие результаты получены для НК в составе ИНС, СНС и АИС.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Рассмотрены различные структуры НК высокоточных БЛА. Представлены алгоритмические способы их коррекции с использованием алгоритмов оценивания.

Исследованы схемы компенсации погрешностей современных НК высокоточных БЛА. На основе анализа известных НК высокоточных БЛА разработаны алгоритмические решения, позволяющие повысить точность навигационных определений в условиях изменяющейся помеховой обстановки.

В условиях сложного движения высокоточных БЛА модели погрешностей навигационных систем имеют нелинейный характер, поэтому их применение в алгоритмах оценивания теоретически приводит повышению точности. Однако на практике априорные нелинейные модели достоверно неизвестны, поэтому использование в алгоритмах оценивания более грубых линейных моделей остается актуальным. Преимуществом линейных АФК также является их простота при реализации в БЦВМ.

Таким образом, в процессе диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Осуществлен выбор вариантов структур высокоточного НК на основе комбинации навигационных систем в зависимости от помеховой обстановки: НК в составе ИНС, СНС и АИС, а в условиях значительных помех – НК в составе ИНС и РЛС.

2. Разработан алгоритм и предложена схема коррекции динамических погрешностей АИНС на основе формализованных связей погрешностей с доминирующими возмущениями, позволяющие компенсировать динамические погрешности с использованием линейного АФК. Сформированы измерения для АФК как функции возмущающих факторов, действующих на АИНС.

3. Разработана схема коррекции АИНС, включающая АНФК. Особенностью предложенной схемы является компенсация нарастания угла отклонения ГСП от сопровождающего трехгранника с помощью нелинейного регулятора. Нелинейный регулятор реализован с использованием SDC – представления модели.

4. Разработана методика выбора используемого в НК информационного поля и навигационных систем НК для проведения коррекции ИНС с учетом

условий функционирования БЛА. Формирование методики выбора информационного поля при управлении БЛА при полете по маршруту. Предложена методика формирования эталонов для алгоритмов распознавания.

5. Предложены критерии формирования динамического рабочей структуры НК в процессе полёта БЛА в меняющейся помеховой обстановке, позволяющие упростить решение. Критерии базируются на анализе оценок дисперсий приведённых измерительных шумов.

6. Проведено моделирование тестовой математической модели ошибок ИНС с различными внешними источниками информации, а также моделирование по данным лабораторного эксперимента.

Результаты моделирования продемонстрировали работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов при решении рассмотренных задач.

Анализ результатов моделирования показал, что разработанные алгоритмические способы позволяют повысить эффективность НК БЛА при его функционировании в различной помеховой обстановке.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чыонг Ф. С. Выбор коэффициентов усиления контура системы стабилизации угла тангажа беспилотного летательного аппарата с учетом допусков на аэродинамические и массово-центровочные характеристики // Политехнический молодежный журнал. 2018. №. 5. С. 2-2. DOI: [10.18698/2541-8009-2018-5-317](https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-5-317). (0,8 п.л.).
2. Фам Суан Чыонг. Проектирование системы управления и навигационного комплекса беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 323-329. (1,06 п.л.).
3. Фанг Ф. С., Хыонг Ч. Н., Чыонг Ф. С. Алгоритмы коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 467-473. (0,85 п.л./0,5 п.л.).
4. Перспективные направления развития систем ориентации и навигации летательных аппаратов /Фам С. Ч. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. №. 3. С. 123-129. (1,1 п.л./0,4 п.л.).
5. Фам С. Ч., Суркова А. Д., Селезнева М. С. Исследование системы маршрутной коррекции бортовой навигационной системы беспилотного летательного аппарата по радиолокационным изображениям местности // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. №. 3. С. 129-134. (0,88 п.л./0,6 п.л.).
6. Фам С.Ч., Клычников В.В. Разработка алгоритма распознавания цели беспилотным летательным аппаратом по радиолокационным изображениям местности // Инженерная физика. 2020. № 1. С. 31-39. (1,06 п.л./0,9 п.л.).
7. Чыонг Ф. С. Способ коррекции астроинерциальной системы летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. - № 7. С.320-324. (0,8 п.л.).
8. Чыонг Ф. С., Селезнева М. С., Неусыпин К.А., Разработка структуры навигационного комплекса высокоточного беспилотного летательного аппарата

для полёта в атмосфере // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т.76. №8. С. 357-361. (0,85 п.л./0,4 п.л.).

9. Фам Суан Чыонг. Синтез коэффициентов заданного закона стабилизации угла тангажа беспилотного летательного аппарата // Всероссийская студенческая конференция «Студенческая научная весна», посвященная 165-летию со дня рождения В.Г.Шухова. 2018. С 245-247. (0,2 п.л.).

10. Truong P. X., Konstantin N., Mariya S. Study of the System of Route Correction of the UAV Navigation System // 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). IEEE, 2020. С. 1-3. (0,7 п.л/0,3 п.л.).

11. Фам С.Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Исследование системы маршрутной коррекции навигационной системы БЛА // XXVII Санкт-Петербургская конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2020. С.346-348. (0,7 п.л./0,3 п.л.).

12. Чан Н.Х., Фам С.Ч., Клычников В.В. Формирование моделей погрешностей инерциальных навигационных систем // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С.866-869. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

13. Система маршрутной коррекции беспилотного летательного аппарата по радиолокационным изображениям местности // Фам С. Ч. [и др.] Будущее машиностроения России. Сборник докладов. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. 2018. С.679-682. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

14. Truong P. X., Shachtarin B. I., Tsibizova T. Y. The Correction Method of the Astroinertial System of the Aircraft // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. С. 851-855. (0,4 п.л./0,1 п.л.).

Подписано в печать2021. Заказ №
Объем 1 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, (499) 263-62-01