

На правах рукописи



Колганов Леонид Александрович

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ГОРОДСКОЙ АЭРОМОБИЛЬНОСТИ**

2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Антонов Дмитрий Александрович**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» Московского авиационного института

Официальные оппоненты: **Голован Андрей Андреевич**
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией управления и навигации механико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Крылов Алексей Анатольевич
кандидат технических наук, начальник сектора 133 отдела 130 акционерного общества «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»

Защита диссертации состоится 25 ноября 2025г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института и на сайте https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=185940

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.327.12, к.т.н., доц.



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из инновационных направлений развития воздушного транспорта является реализация городской аэромобильности, предполагающая создание и внедрение нового безопасного и доступного воздушного транспорта, в том числе беспилотных летательных аппаратов для аварийных служб, перевозки пассажиров и доставки товаров в условиях плотной городской застройки. Для обеспечения безопасного использования воздушного пространства пилотируемой авиацией сформированы требования в том числе к качеству определения координат с помощью навигационных систем воздушных судов. Для беспилотной авиации такие требования находятся в стадии разработки. В настоящее время одним из основных источников координат в авиации является аппаратура спутниковой навигации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Работа аппаратуры спутниковой навигации (АПСН) подвержена влиянию различных естественных и искусственных факторов, приводящих к появлению искажений в измерениях. Эти искажения могут привести к невозможности обеспечения качества определения координат, что в конечном итоге отрицательно влияет на безопасность использования беспилотных летательных аппаратов в городском воздушном пространстве. Поэтому обеспечение качества определения координат для беспилотных летательных аппаратов при реализации городской аэромобильности является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является обеспечение качества определения координат беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности с использованием информационно-измерительной системы, включающей методические, алгоритмические и программные средства обеспечения существующих и перспективных требований к точности и целостности определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие научно-практические задачи:

— провести анализ факторов, влияющих на качество определения координат, сформулировать существующие и перспективные требования к качеству определения координат для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности;

— разработать структуру и процедуру работы информационно-измерительной системы обеспечения качества определения координат для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности;

— разработать алгоритм контроля целостности определения координат, включая: оценщик на основе дискретного стохастического фильтра Калмана, способ формирования входных измерений для оценщика и областей их неопределённости, критерии и правила

принятия решения о возможном наличии скачкообразных и медленно нарастающих искажений в измерениях псевдодальностей аппаратуры спутниковой навигации;

— разработать методику, программно-математическое обеспечение и провести настройку параметров разработанного алгоритма контроля целостности координат под существующие и перспективные требования к качеству определения координат;

— разработать методику, программно-математическое обеспечение и провести исследование на соответствие качества определения координат как существующим в авиационной отрасли требованиям, так и перспективным требованиям для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности.

Объект исследования. Информационно-измерительная система обеспечения качества определения координат для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности.

Предмет исследования. Методические, алгоритмические и программные средства обеспечения существующих и перспективных требований к точности и целостности определения координат с использованием инерциальных и спутниковых измерений.

Методы исследования. Методы статистического анализа, корреляционная теория случайных процессов, теория оптимальной фильтрации, метод имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

— информационно-измерительная система, включающая методические, алгоритмические и программные средства обеспечения качества определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений, позволяет обеспечить существующие требования к точности определения координат 16 м при целостности на уровне $(1-2) \cdot 10^{-7}$, со временем выдачи предупреждения до 6 с;

— способ расчета статистических характеристик входных измерений алгоритма контроля целостности для рассмотренного в работе информационного базиса информационно-измерительной системы позволяет обнаруживать за 10 с наличие скачкообразных и медленно нарастающих искажений в измерениях псевдодальностей одновременно для всего рабочего созвездия аппаратуры спутниковой навигации при скорости нарастания искажений от 2,5 м/с и более;

— алгоритм контроля целостности определения координат беспилотного летательного аппарата для рассмотренного в работе информационного базиса информационно-измерительной системы позволяет обнаруживать и оценивать величину искажений в измерениях псевдодальностей, приводящих к скорости нарастания погрешности определения координат от 0,48 м/с и более;

— методика исследования качества определения координат для беспилотных летательных аппаратов при реализации городской аэромобильности позволяет оценить границы применимости разработанных алгоритмов контроля целостности координат для существующих и перспективных требований, в том числе для преднамеренного искажения измерений псевдодальностей до всех навигационных космических аппаратов рабочего созвездия глобальных навигационных спутниковых систем.

Научная новизна работы:

— разработана стохастическая модель представления областей неопределенности входных измерений для предложенного способа формирования входных измерений алгоритма контроля целостности координат на основе учета разностей измерений псевдодальностей аппаратуры спутниковой навигации и их прогнозов по показаниям инерциальной навигационной системы;

— разработаны критерии и правила обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений в измерениях псевдодальностей для разработанного алгоритма контроля целостности координат на основе проверки гипотез об отсутствии в измерениях псевдодальностей искажений, приводящих к невозможности обеспечения качества определения координат;

— разработана методика исследования качества определения координат для беспилотных летательных аппаратов при реализации городской аэромобильности, в том числе для случая наличия естественных и искусственных искажений в измерениях псевдодальностей до нескольких или всех навигационных космических аппаратов рабочего созвездия глобальных навигационных спутниковых систем.

Практическая значимость результатов исследования:

— разработаны структура и процедура работы информационно-измерительной системы обеспечения качества определения координат для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности;

— разработаны алгоритмы контроля целостности определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений и программные реализации этих алгоритмов, включая методику и программно-математическое обеспечение настройки параметров разработанных алгоритмов под существующие и перспективные требования к качеству определения координат для беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности;

— разработаны методика, программно-математическое обеспечение и получены результаты исследования качества определения координат для беспилотных летательных аппаратов при реализации городской аэромобильности для нескольких информационных базисов разработанной информационно-измерительной системы.

Реализация и внедрение. Результаты научных исследований, полученные при подготовке диссертационной работы, использованы в АО «КТ — Беспилотные системы» и в учебном процессе кафедры «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» МАИ.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: XXXI Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», 14-20 сентября 2022 г., Алушта; «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» 22 ноября 2021 г., Москва; XXIII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (XXIII КМУ 2021) 16-19 марта 2021 г. Санкт-Петербург, Россия; Юбилейная XX конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (XX КМУ 2018), 20-23 марта 2018 г., Санкт-Петербург.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 — статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по специальности 2.2.11.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, трех приложений, изложенных на 147 страницах, в том числе 120 страниц — основной части, 3 приложениях на 27 страницах. Работа содержит 45 рисунков и 25 таблиц. Список литературы содержит 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы рассматриваются особенности применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в общем и БЛА вертикального взлёта и посадки (БЛА-ВВП), в частности, как одного из основных типов БЛА, при реализации городской аэромобильности (ГАМ). Сформулированы существующие и перспективные требования к качеству определения координат для БЛА при реализации ГАМ. Приводится анализ факторов, влияющих на качество определения координат, и анализ наиболее востребованных методов и средств обеспечения качества определения координат.

Наиболее полными в части охвата рассмотренных факторов можно считать методы автономного контроля целостности приёмника (RAIM) и методы бортового автономного контроля целостности (AAIM). Одним из достоинств методов семейства AAIM является возможность их применения для БЛА-ВВП при реализации ГАМ, в том числе за счет использования информационно-измерительной системы (ИИС), включающей методические, алгоритмические и программные средства обеспечения существующих и перспективных требований к качеству (точности и целостности) определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений.

На рис. 1 приведены обобщенные результаты анализа охвата методами и средствами обеспечения качества определения координат основных факторов, влияющих на качество определения координат для БЛА-ВВП при реализации ГАМ.

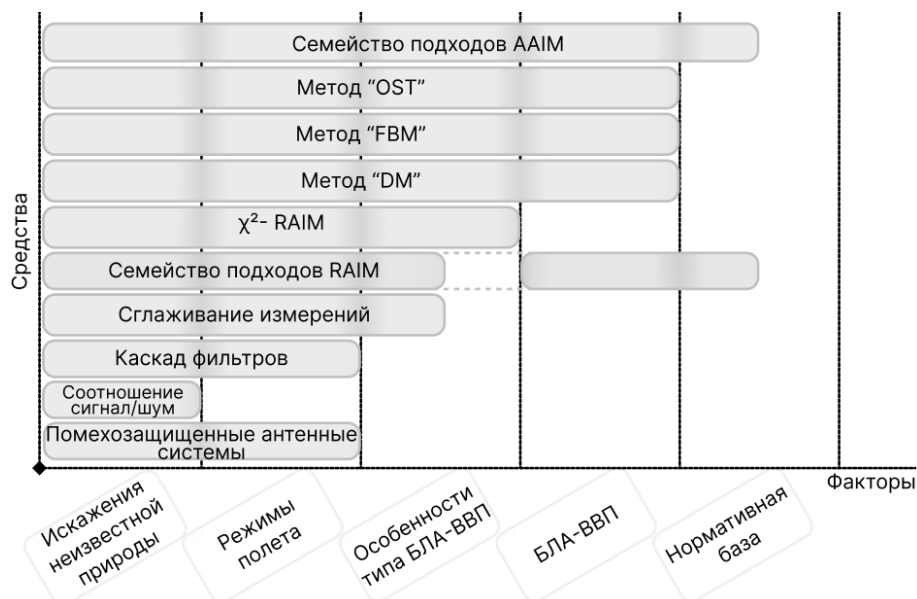


Рис. 1 — Охват методами и средствами обеспечения качества определения координат факторов, влияющих на качество определения координат для БЛА-ВВП при реализации ГАМ

Использование ИИС позволяет синтезировать, настроить и исследовать алгоритмы контроля целостности (КЦ) определения координат на соответствие существующим и перспективным требованиям для БЛА при реализации ГАМ.

В главе 1 приведено описание структуры и процедуры работы ИИС обеспечения качества определения координат. К основным особенностям предлагаемой процедуры работы ИИС относятся:

- формирование информационного базиса (этап 1) производится выбором факторов, которые необходимо учитывать при синтезе и исследовании свойств алгоритмов КЦ, включая анализ и выбор существующих и перспективных требований к точности и целостности определения координат;
- синтез алгоритмов КЦ на основе стохастического дискретного фильтра Калмана (этап 2);
- настройка синтезированного алгоритма КЦ под информационный базис на основе поиска оптимальных с точки зрения обеспечения требуемых уровней точности и целостности определения координат, комбинаций параметров алгоритма КЦ с учётом выбранного информационного базиса (этап 3);
- оценка соответствия свойств синтезированного алгоритма КЦ существующим требованиям к точности и целостности определения координат, заложенным в информационный базис (этап 4);
- оценка соответствия свойств синтезированного алгоритма КЦ перспективным требованиям к точности и целостности определения БЛА при реализации ГАМ, заложенным в информационный

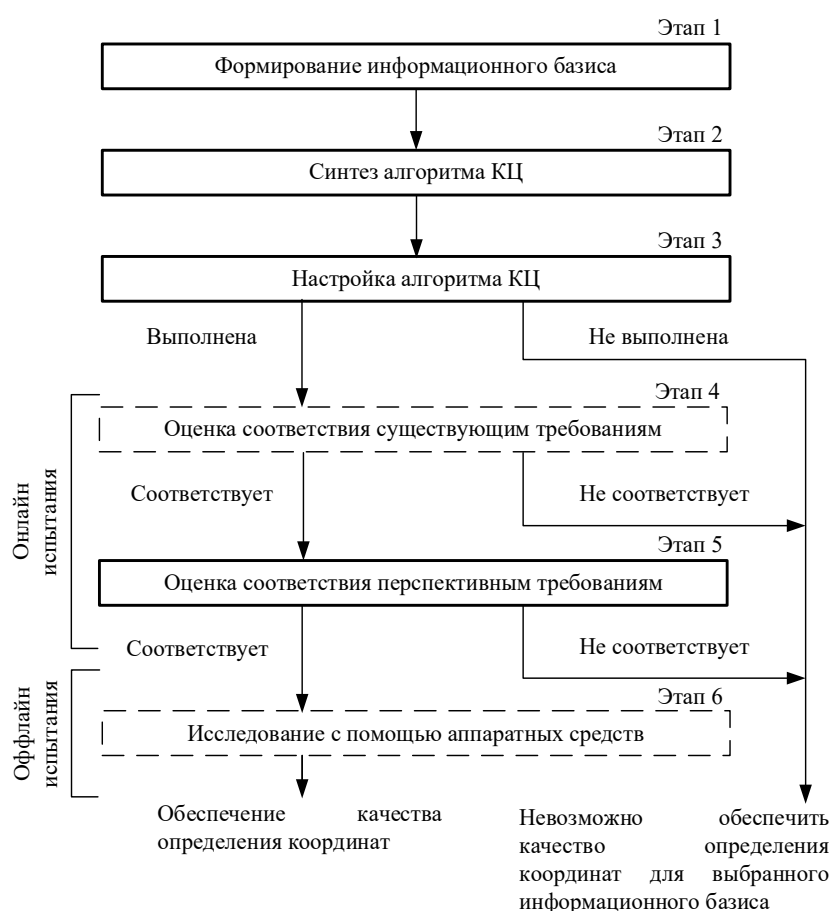


Рис. 2 — Структура ИИС для БЛА при реализации ГАМ

базис (этап 5).

Этап 6 является общепринятым в авиационной отрасли и предназначены для исследования свойств синтезированных алгоритмов с использованием аппаратных средств, например, с использованием имитатора спутниковых навигационных сигналов. В диссертационной работе этот этап процедуры работы ИИС не рассматривается.

Структура ИИС для БЛА при реализации ГАМ с учетом описанных этапов приведена на рис. 2.

В главе 2 приводится обзор существующих образцов

БЛА-ВВП. Для них выделены обобщающие диапазоны характеристик и типовые этапы полёта. Также в главе приведён обзор требований и рекомендаций, направленных на интеграцию беспилотных воздушных систем в общее воздушное пространство с пилотируемой авиацией. Определены требуемые уровни точности и целостности навигационного решения БЛА-ВВП для этой работы. В главе дана обобщённая структура аппаратного обеспечения инерциально-спутниковой навигационной системы БЛА-ВВП, а также вариант расширения состава измерителей параметров ориентации и навигации.

Проведён анализ возможных источников искажений измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата (НКА) ГНСС рабочего созвездия АПСН. Выделены такие категории искажений, как «непреднамеренные» и «преднамеренные». Непреднамеренными искажениями измерений псевдодальности до НКА называются искажения, вызванные тем, что при прохождении пути от НКА до АПСН сигнал претерпевает множество изменений, вызванных, в том числе анизотропными свойствами земной атмосферы и переотражением сигналов НКА — многолучёвостью. Преднамеренные искажения подразделяются на «энергетические» и «уводящие». Энергетические искажения нацелены на зашумление широкого спектра сигналов НКА ГНСС, вследствие чего АПСН не может определить координаты. Под «уводящим»

понимается преднамеренное искажение измерений псевдодальностей до всех НКА рабочего созвездия, характеризующееся формированием ложных координат при наличии признаков исправности АПСН. Приведён вариант описания суперпозиции непреднамеренных и преднамеренных искажений измерения псевдодальности до НКА с помощью волнового представления математической модели искажения.

Приведён вариант описания волновой математической модели искажений измерений псевдодальностей до НКА $\delta\rho_i$ для i -го НКА:

$$\delta\rho_i = a_i + b_i \cdot t + c_i \cdot t^2, \quad (1)$$

где $\delta\rho_i$ — суперпозиция искажения измерения псевдодальности до i -ого НКА; a_i, b_i, c_i — коэффициенты постоянной, линейной и квадратической составляющих искажения измерения псевдодальности до i -ого НКА; t — время с момента проявления искажения измерений псевдодальности до i -го НКА.

Идентификация и оценка параметров предлагаемой математической модели искажений измерений псевдодальностей до НКА в виде волновой структуры позволяет в том числе снизить влияние компонент, вызванных полным или частичным неучетом в модели ошибок измерений АПСН отклонений эфемеридных данных, ошибок бортового хранителя времени НКА, ионосферных и тропосферных задержек, ошибок многолучевого приёма, а также внешних воздействий на сигнал НКА.

В главе 3 приводится описание унифицированной структуры алгоритма КЦ инерциально-спутникового определения координат БЛА. Приведенная структура содержит в себе такие узлы, как алгоритм оценки вектора состояния определения координат БЛА (оценитель), алгоритмы обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений измерений псевдодальностей до НКА и другие. В результате работы алгоритмов обнаружения НКА распределяются по группам «рабочие», «проблемные» и «сопровождаемые». Первые две образуют рабочее созвездие АПСН. Также эта глава содержит описание авторских методик расчета порогов принятия решения о наличии искажений в измерениях АПСН.

В алгоритмах обнаружения используется гипотеза об отсутствии скачкообразных и медленно нарастающих искажений в измерениях псевдодальностей до НКА. В этом случае «благоприятными» можно считать два исхода работы алгоритма КЦ: формирование признака отказа при наличии искажений, приводящих к нарушению требуемой точности определения координат, или признака готовности при отсутствии таких искажений в измерениях АПСН. Тогда ошибкой первого рода «ложное срабатывание» является формирование признака отказа до проявления искажения измерений, а ошибкой второго рода «пропуск события» — формирование признака готовности после истечения допустимого порога по времени обнаружения искажений при условии, что отклонение оценки координат превысило величину горизонтальной или

вертикальной областей предупреждения Horizontal/Vertical Alert Limit (HAL и VAL). Величина этой области определяется существующими и перспективными требованиями к качеству определения координат.

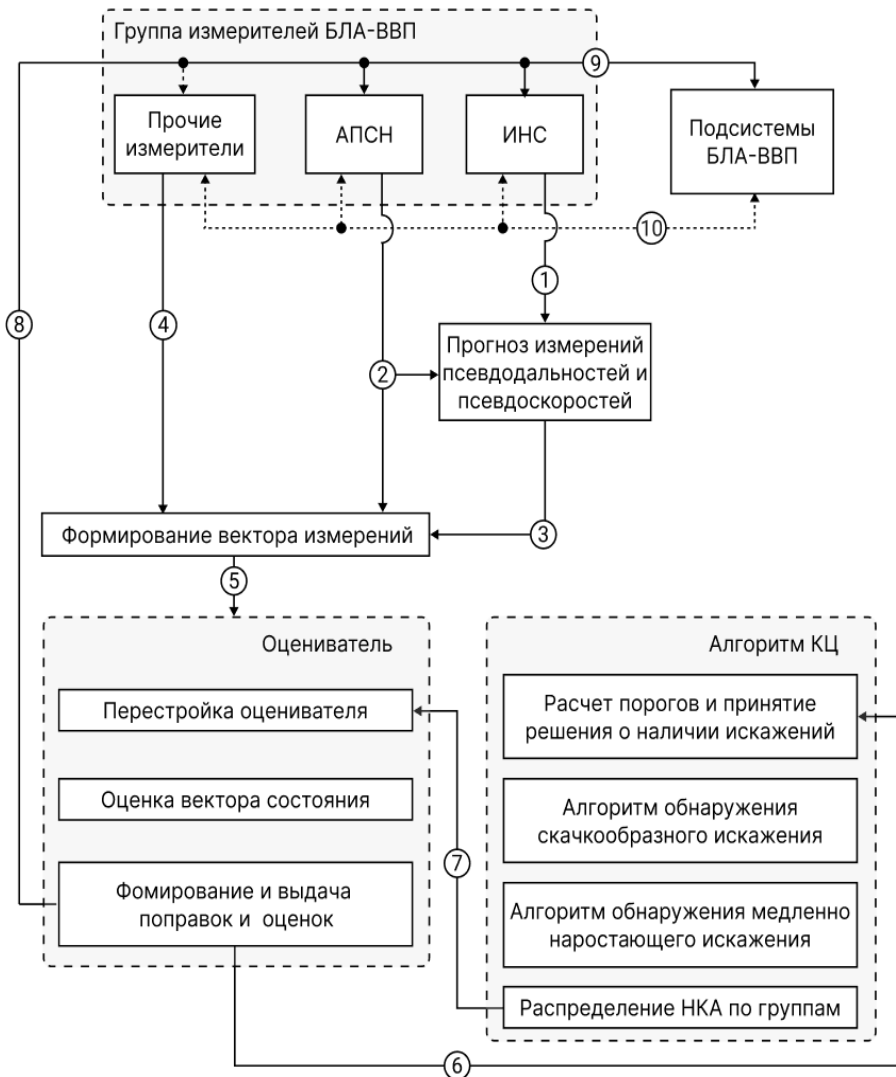


Рис. 3 — Унифицированная структура алгоритма КЦ

На рис. 3 приведено обобщенное представление унифицированной структуры алгоритма КЦ. Измерения псевдодальностей НКА группы «рабочие» используются при формировании вектора измерений оценителя. Измерения псевдодальностей НКА группы «проблемные» также используются при формировании вектора измерений оценителя. Для НКА, входящих в эту группу, выполняется расширение вектора состояния путем включения волновых коэффициентов математической модели искажения псевдодальности с целью оценки величины

возможных непреднамеренных (многолучевость) или преднамеренных искажений в измерениях. В группу «рабочих» включаются НКА, прошедшие допусковый контроль. Так же в эту группу переходят НКА из группы «проблемных», если параметры волновых коэффициентов модели искажения превысили установленный порог принятия решения о переводе НКА из группы «проблемных» в группу «рабочих» по результатам работы алгоритма КЦ.

Измерения НКА группы «сопровождаемых» не используются в решении навигационной задачи. Также для этой группы не производится расширение вектора состояния волновыми коэффициентами математической модели искажения. Логика распределения НКА по группам «рабочие», «проблемные» и «сопровождаемые», в рамках узла «Алгоритм КЦ» рис. 3, приводится на рис. 4.

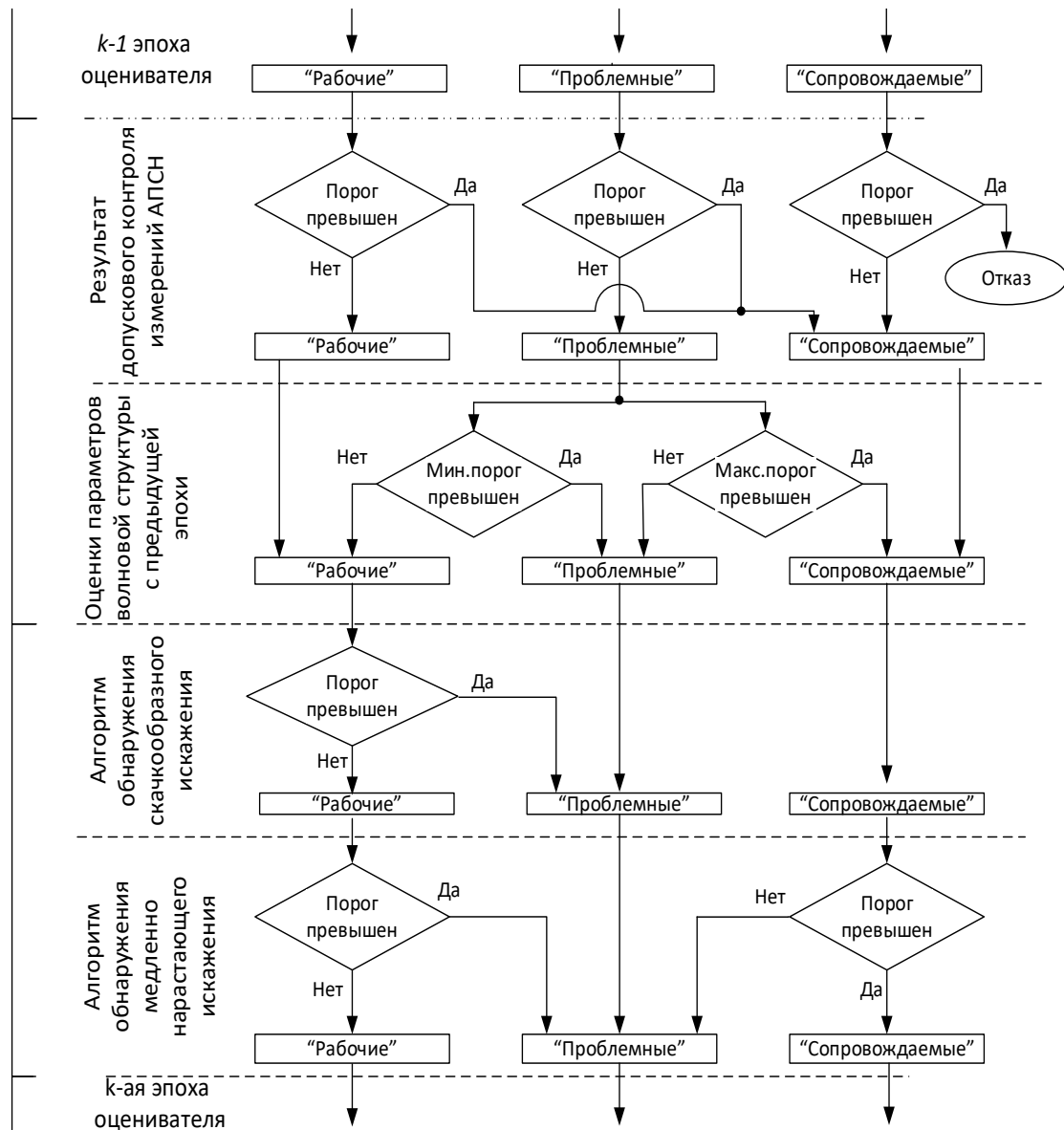


Рис. 4 — Обобщённая структура распределения НКА по группам «рабочие», «проблемные» и «сопровождаемые»

В качестве оценителя в унифицированной структуре алгоритма КЦ инерциально-спутникового навигационного решения предлагается использовать дискретный расширенный фильтр Калмана.

Вектор состояния $\bar{X}$ переменной структуры содержит параметры математической модели погрешностей инерциальной навигационной системы (ИНС), математической модели ухода опорного генератора АПСН и волнового представления модели искажений измерений псевдодальностей до НКА из группы «проблемные» имеет вид:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_{X,Y,Z}, \Delta K_{\Omega_{X,Y,Z}}, \\ \Delta n_{X,Y,Z}, \Delta K_{n_{X,Y,Z}}, \delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{АПСН}}, \delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^{\text{АПСН}}, \\ \Delta\rho_1, a_1, b_1, \dots, \Delta\rho_l, a_l, b_l \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3 — ошибки определения координат ИНС; x_4, x_5, x_6 — ошибки определения проекций линейной скорости ИНС; α, β, γ — ошибки определения базового трёхгранника

ИНС; $\Delta\Omega_{X,Y,Z}, \Delta n_{X,Y,Z}, \Delta K_{\Omega_{X,Y,Z}}, \Delta K_{n_{X,Y,Z}}$ — параметры модели погрешности измерений инерциальных датчиков ИНС; $\delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{АПСН}}, \delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^{\text{АПСН}}$ — уход и скорость ухода опорного генератора АПСН; $\Delta\rho_1, a_1, b_1, \dots, \Delta\rho_l, a_l, b_l$ — параметры волновой модели искажений измерений псевдодальностей до «проблемных» НКА.

При этом, вектор измерений $\bar{Z}$ имеет вид:

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} \{\rho_1^{\text{ИНС}} - \rho_1^{\text{АПСН}}, \rho_2^{\text{ИНС}} - \rho_2^{\text{АПСН}}, \dots, \rho_i^{\text{ИНС}} - \rho_i^{\text{АПСН}}\}^T \\ \{\dot{\rho}_1^{\text{ИНС}} - \dot{\rho}_1^{\text{АПСН}}, \dot{\rho}_2^{\text{ИНС}} - \dot{\rho}_2^{\text{АПСН}}, \dots, \dot{\rho}_i^{\text{ИНС}} - \dot{\rho}_i^{\text{АПСН}}\}^T \\ \bar{Z}_{\text{ИНС}}^{\text{ИНС}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\rho_i^{\text{АПСН}}, \dot{\rho}_i^{\text{АПСН}}$ — измерение псевдодальности и псевдоскорости до i -го НКА $i = \overline{1, n}$, n — количество НКА рабочего созвездия; $\rho_n^{\text{ИНС}}, \dot{\rho}_n^{\text{ИНС}}$ — прогноз измерения псевдодальности и псевдоскорости до i -ого НКА; $\bar{Z}_{\text{ИНС}}^{\text{ИНС}}$ — составляющая вектора измерений для включения информации от других источников.

Предлагаемая в работе схема построения оценщика с использованием волнового представления в описании искажений измерений псевдодальностей до НКА позволяет оценивать искажения измерений псевдодальностей (и, при необходимости, исключать из решения) до $(n - 4)$ НКА. Когда число НКА в группе «рабочие» становится менее 4, формируется признак отказа алгоритма КЦ.

Алгоритмы обнаружения искажений измерений псевдодальностей до НКА подразделяются на алгоритм обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений. В работе показан способ формирования измерений и стохастические модели представления областей неопределённостей измерений для этих алгоритмов.

Входные измерения алгоритмов обнаружения искажений представляют собой вторые (третьи) разности измерений псевдодальностей до НКА. При этом первая разность между измеренными и расчетными псевдодальностями компенсирует влияние движения БЛА и НКА. Вторая разность между первыми разностями для текущей и предыдущей эпох измерений АПСН компенсирует влияние квазипостоянных составляющих искажений измерений. Третья разность может использоваться для АПСН, в которых не предусмотрена обратная связь по оценкам ухода и скорости ухода опорного генератора. Для таких АПСН характерны скачкообразные изменения измерений псевдодальности в моменты коррекции ухода опорного генератора. При этом минимальное число НКА в группе «рабочие» НКА увеличивается до 5.

Алгоритм обнаружения скачкообразных искажений строится на основе контроля приращения вторых (третьих) разностей псевдодальностей. Приведено выражение для критерия принятия решения о наличии или отсутствии скачкообразного искажения в измерениях АПСН:

$$|(\Delta)\nabla\Delta\rho_i^{\text{АПСН}}(t_k, t_{k-1})| < \min\left(\sqrt{HAL_{\rho_i}^2 + VAL_{\rho_i}^2}, K_{\rho} \cdot \sqrt{D_{\rho_i}(t_k, t_{k-1})}\right), \quad (4)$$

где $(\Delta)\nabla\Delta\rho_i^{\text{АПНС}}$ — вторая (третья) разность псевдодальностей до i -ого НКА; $D_{\rho_i}(t_k, t_{k-1})$ — дисперсия разностей измерений псевдодальности до i -ого НКА; K_ρ — коэффициенты усиления алгоритма обнаружения скачкообразного искажения измерения псевдодальности до i -ого НКА, определяющие вероятность превышения заданного порога; $HAL_{\rho_i}, VAL_{\rho_i}$ — величины HAL и VAL в пространстве измерений АПНС.

В критерии (4) в качестве порогового значения принят минимум из дисперсии разностей псевдодальностей с учетом коэффициента усиления и заданных защитных пределов и проекции HAL и VAL на пространство измерений АПНС, установленных для зональной навигации за счет учета требований к режимам полёта.

Для предложенного варианта формирования вторых (третьих) разностей псевдодальностей, дисперсия измерений примет вид:

$$D_{\rho_i}(t_k, t_{k-1}) \approx D_{\rho_i}^{\text{АПНС}}(t_k) + D_{\rho_i}^{\text{АПНС}}(t_{k-1}) + D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}(t_k) + D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}(t_{k-1}) + \quad (5)$$

$$\left[D_{\rho_0}^{\text{АПНС}}(t_k) + D_{\rho_0}^{\text{АПНС}}(t_{k-1}) + D_{\rho_0}^{\text{ИНС}}(t_k) + D_{\rho_0}^{\text{ИНС}}(t_{k-1}) \right], \quad (6)$$

$$D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}(t_k) \approx D_{\delta\lambda, \delta\varphi_i} + D_{\delta h_i},$$

где $D_{\rho_i}(t_k, t_{k-1})$ — дисперсия второй(третьей) разности измерения псевдодальности до i -ого НКА; $D_{\rho_i}^{\text{АПНС}}$ — дисперсия шумов измерений псевдодальности АПНС i -ого НКА; $D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}$ — дисперсия прогноза измерений псевдодальности i -ого НКА; $D_{\rho_0}^{\text{АПНС}}$ — дисперсия шумов измерений псевдодальности опорного НКА; $D_{\rho_0}^{\text{ИНС}}$ — дисперсия прогноза шумов измерений псевдодальности опорного НКА; $D_{\delta\lambda, \delta\varphi_i}$ — прогноз дисперсии определения планового местоположения БЛА; $D_{\delta h_i}$ — прогноз дисперсии определения высоты БЛА.

В выражении (5) элементы в квадратных скобках описывают дисперсию третьей разности измерения псевдодальности, но не используются для дисперсии второй разности.

Дисперсии шумов измерений псевдодальностей до НКА определяются производителем АПНС. В рамках этой работы их значения принимаются неизменными. Так как получение численных значений ковариаций в режиме реального времени затруднительно, вид дисперсии ошибки измерений псевдодальностей АПНС имеет вид:

$$D_{\rho_i}(t_k, t_{k-1}) = 2D_{\rho_i}^{\text{АПНС}} + D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}(t_k) + D_{\rho_i}^{\text{ИНС}}(t_{k-1}). \quad (7)$$

Ввиду коррелированности ошибок оценок погрешностей инерциально-спутникового определения координат для БЛА на моменты времени t_k и t_{k-1} , при заданном HAL, прогноз дисперсии $D_{\delta\lambda, \delta\varphi_i}(t_k, t_{k-1})$ представляется функцией, зависящей от $D_{\delta\lambda}^{\text{ИНС}}(t_k, t_{k-1})$ и $D_{\delta\varphi}^{\text{ИНС}}(t_k, t_{k-1})$. Чтобы вычислить эти значения необходимо сформировать корреляционную матрицу $C(t_k, t_{k-1})$ между $\bar{\epsilon}_k$ — вектором ошибок прогноза погрешности оценок (экстраполированной оценки) вектора прогноза состояния системы $\hat{X}_k$ и $\bar{\epsilon}_{k-1}$ — вектором ошибок оценок вектора состояния $\hat{X}_{k-1}$

на предыдущую эпоху (t_{k-1}). Для дискретного оптимального фильтра Калмана связь между $\bar{e}_k$ и $\bar{e}_{k-1}$ имеет следующий вид:

$$\bar{e}_k = \Phi_{k/k-1} \cdot \bar{e}_{k-1} + \Gamma_{k/k-1} \cdot \bar{\omega}_{k-1}, \quad (8)$$

где $\bar{\omega}_{k-1}$ — вектор шумовых составляющих ошибок гироскопов и акселерометров, представленных в виде несмещенного гауссовского случайного процесса типа «белый шум»; $\Phi_{k/k-1}$ — дискретный вид матрицы динамики системы.

Тогда матрица $C(t_k, t_{k-1})$ будет иметь вид:

$$C(t_k, t_{k-1}) = M[(\bar{e}_k - \bar{e}_{k-1}), (\bar{e}_k - \bar{e}_{k-1})^T] = S_k + P_{k-1} + 2M[\bar{e}_k, \bar{e}_{k-1}^T], \quad (9)$$

где $M[\bar{e}_k, \bar{e}_{k-1}^T] = \Phi_{k/k-1} M[\bar{e}_{k-1}, \bar{e}_{k-1}^T] + \Gamma_{k/k-1} M[\bar{\omega}_{k-1}, \bar{e}_{k-1}^T] = \Phi_{k/k-1} P_{k-1}$ при условии некоррелированности вектора шумов системы $\bar{\omega}_{k-1}$ и ошибок оценок $\bar{e}_{k-1}$ на момент времени (t_{k-1}).

$$\begin{aligned} C(t_k, t_{k-1}) &= S_k + P_{k-1} + 2\Phi_{k/k-1} P_{k-1} = \\ &= \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k/k-1} Q_1 \Gamma_{k/k-1}^T + P_{k-1} + 2\Phi_{k/k-1} P_{k-1} = \\ &= \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + (E + 2\Phi_{k/k-1}) P_{k-1} + \Gamma_{k/k-1} Q_1 \Gamma_{k/k-1}^T, \end{aligned} \quad (10)$$

где Q_1 — определяется как $M[\bar{\omega}_i \bar{\omega}_j^T] = Q_1 \delta_{ij}$, δ_{ij} — символ Кронекера; S_k, P_{k-1} — дискретный вид априорной и апостериорной матриц ковариации.

Для приведенного вектора состояния $D_{\delta\lambda, \delta\varphi_i}(t_k, t_{k-1})$ будет иметь следующий вид:

$$D_{\delta\lambda, \delta\varphi_i}(t_k, t_{k-1}) = \left\{ \frac{\partial \rho_i^{\text{ИНС}}}{\partial \lambda^{\text{ИНС}}}(t_k) \quad \frac{\partial \rho_i^{\text{ИНС}}}{\partial \varphi^{\text{ИНС}}}(t_k) \right\} \cdot C^1(t_k, t_{k-1}), \quad (11)$$

$$C^1(t_k, t_{k-1}) = \begin{bmatrix} C(t_k, t_{k-1})_{1,1} & C(t_k, t_{k-1})_{1,2} \\ C(t_k, t_{k-1})_{2,1} & C(t_k, t_{k-1})_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\delta\lambda}^{\text{ИНС}}(t_k, t_{k-1}) & C(t_k, t_{k-1})_{1,2} \\ C(t_k, t_{k-1})_{2,1} & D_{\delta\varphi}^{\text{ИНС}}(t_k, t_{k-1}) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $\frac{\partial \rho_i^{\text{ИНС}}}{\partial \lambda^{\text{ИНС}}}(t_k)$, $\frac{\partial \rho_i^{\text{ИНС}}}{\partial \varphi^{\text{ИНС}}}(t_k)$ — коэффициенты связи пространства состояния и пространство измерений оценщика.

Алгоритм обнаружения медленно нарастающего искажения основан на проверке статистической гипотезы о равенстве нулю средних значений массивов (кольцевых буферов) последних $(\Delta) \nabla \Delta \rho_i^{\text{АПСН}}$, где $j = \overline{k, k-d}$, d — размер массива.

В главе 4 приведены методики настройки и оценки соответствия алгоритмов КЦ требованиям, заложенным в информационный базис. Алгоритмы обнаружения скачкообразного и медленно нарастающего искажения обладают варьируемыми параметрами, изменение которых влияет на свойства этих алгоритмов и позволяет произвести их настройку. Оценка комбинации этих параметров выполняется с применением метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Это обусловлено отсутствием априорной информации о законе распределения комбинаций параметров настройки алгоритма КЦ. Для определения этих параметров применяются методики формирования опорной траектории движения БЛА-ВВП и искажений

измерений псевдодальностей до НКА, аналогичные тем, которые применяются в ходе сертификации АПСН для применения в гражданской авиации.

Также в главе приведены методики формирования автономного инерциального навигационного решения и опорных измерений псевдодальностей до НКА на основе альманахов ГНСС.

Для оценки соответствия свойств синтезированных алгоритмов КЦ требованиям, заложенным в информационный базис, сформирована опорная траектория движения БЛА-ВВП, соответствующая одному из возможных сценариев применения таких аппаратов. Формирование такой траектории выполнено с применением квадратичных кривых Безье.

В главе 5 приведены результаты, полученные на основе предложенной структуры и процедуры работы информационно-измерительной системы обеспечения качества определения координат, а также приведенных в работе методических и алгоритмических средств, и для предложенного вида информационного базиса. Для исследования свойств синтезированных алгоритмов контроля целостности было разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм КЦ, методику его настройки и методику исследования свойств синтезированного алгоритма КЦ на соответствие существующим и перспективным требованиям к точности и целостности определения координат для БЛА-ВВП при реализации городской аэромобильности.

Результат применения метода статистических испытаний при настройке алгоритма КЦ приведён на рис. 5.

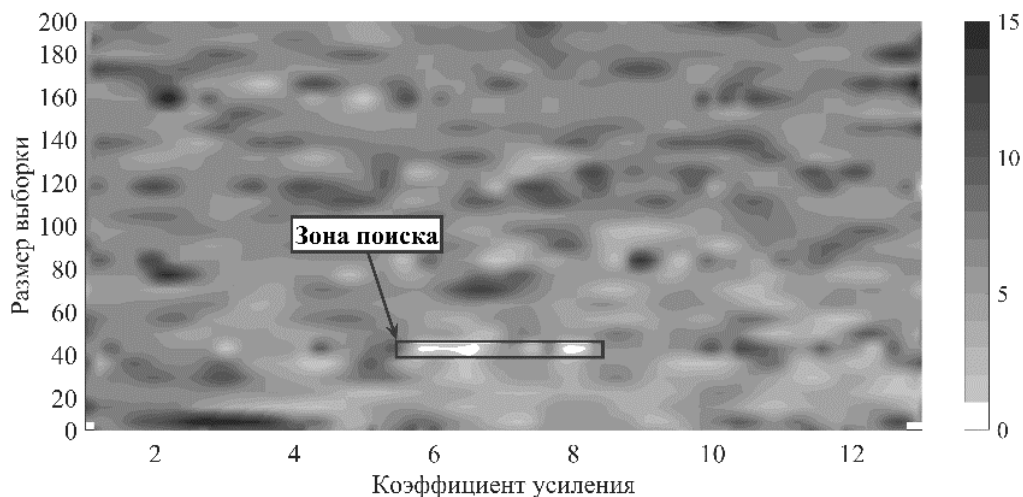


Рис. 5 — Распределение результатов применения метода статистических испытаний в настройке алгоритма КЦ

Из рисунка видно, что по результатам применения этого метода была сформирована область комбинаций параметров алгоритмов обнаружения, для которой не выявлено ложных срабатываний и пропусков событий синтезированного алгоритма КЦ.

С применением метода описания этих областей эллипсами максимальной площади были получены две комбинации параметров настройки алгоритмов КЦ, соответствующие двум отмеченным зонам. Выбор между двумя зонами можно сделать, основываясь на специфике

концепции ГАМ и предполагаемых условиях эксплуатации БЛА-ВВП. При выполнении полётов в непосредственной близости от людей, транспорта, элементов городской застройки и инфраструктуры предпочтительным можно считать формирование признака отказа алгоритма КЦ при меньших воздействиях по отношению к варианту с меньшим числом срабатываний. Такими свойствами обладает область с меньшими значениями параметров настройки алгоритмов КЦ.

Для формирования априорной информации о законе распределения результатов использования метода Монте-Карло для последующих применений предложенной процедуры синтеза и исследования алгоритмов КЦ предложен вариант описания результатов аппроксимирующей поверхностью. Эта информация может использоваться, например, при формировании критериев для эвристических алгоритмов поиска.

В главе приводятся исследование влияния точности инерциальных датчиков на результаты выполнения методики настройки алгоритма КЦ. Исследование показало принципиальную возможность решения поставленной задачи при различных характеристиках измерителей в составе инерциально-спутниковой навигационной системы.

При этом для варианта ИИС БЛА-ВВП, включавшего грубые инерциальные датчики, показан вариант синтеза алгоритмов КЦ, когда настройка этого алгоритма при выбранном информационном базисе невозможна. При этом изменение требований, заложенных в информационный базис, позволило решить задачу настройки с учетом изменения возможной области применения такого БЛА-ВВП.

Также в главе приведены результаты оценки обеспечения качества определения координат. Показана работоспособность предложенных методических, алгоритмических и программных средств в условиях полёта БЛА-ВВП, приближенного к реальному. Выявлены зависимости между изменением вектора скорости БЛА-ВВП и временем формирования признака отказа алгоритма КЦ. Отмечено, что при совершении маневров БЛА-ВВП уменьшается время формирования признака отказа алгоритма КЦ.

Отдельно выделяются результаты оценки обеспечения качества определения координат ИИС в условиях воздействия уводящего искажения. Так как в открытых источниках информация о таких свойствах уводящего искажения как профиль и интенсивность не раскрываются, в работе в качестве такого искажения выбрано линейное приращение искажения измерений АПСН в диапазоне от 0 до 5 м/с. При этом, под «интенсивностью воздействия уводящего искажения» в работе понимается величина приращения отклонения навигационного решения АПСН от опорной траектории за одну эпоху, при условии отсутствия каких-либо средств КЦ измерений.

На рис. 6 приведена зависимость осреднённого отклонения расчетного местоположения БЛА-ВВП от опорного при заданной интенсивности уводящего воздействия.

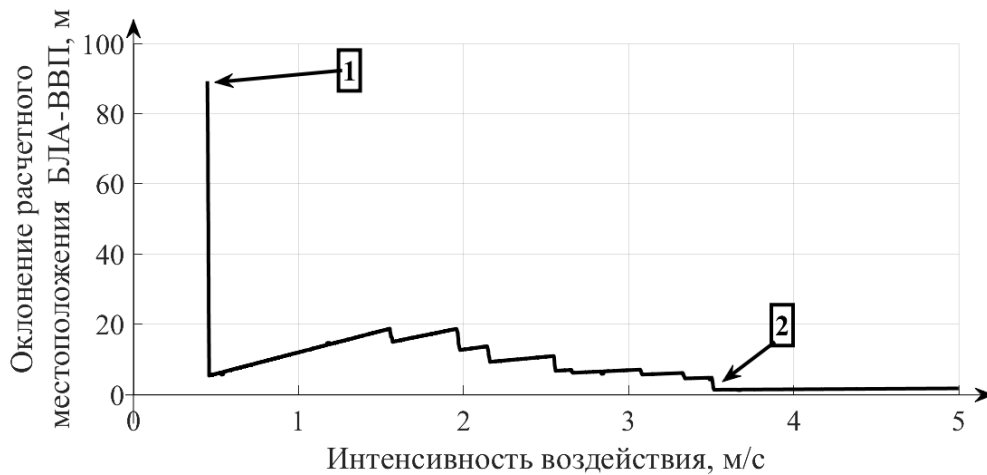


Рис. 6 — Отклонение расчетного местоположения БЛА-ВВП от опорного

Можно отметить, синтезированный алгоритм КЦ в рамках выбранных ограничений имеет зону нечувствительности при интенсивности уводящего искажения от 0,0 до 0,48 м/с (точка 1). В диапазоне воздействий от 0,48 до 3,5 м/с, формируется признак отказа по результатам работы алгоритма обнаружения медленно нарастающих искажений измерений псевдодальностей до НКА. При превышении этого диапазона (точка 2) формируется признак отказа по результатам работы алгоритма обнаружения скачкообразных искажений измерений псевдодальностей до НКА.

Можно наблюдать, что зависимость времени срабатывания алгоритма КЦ имеет ступенчатый характер. Это может быть вызвано динамикой изменения координат инерциально-спутниковой навигационной системы под воздействием уводящего искажения и маневрированием БЛА-ВВП при полёте.

Максимальное отклонение расчетного местоположения БЛА-ВВП от опорного составило 89,7 м, при интенсивности воздействия 0,48 м/с. При этом, без использования синтезированного алгоритма КЦ уровень отклонения составил 179,2 м. Минимальный уровень отклонения составил 1,5 м при интенсивности более 3,5 м/с.

Для оценки соответствия синтезированного алгоритма КЦ на основе информационного базиса ИИС БЛА-ВВП существующим требованиям (RNP0.02, точный заход на посадку по категории I) было проведено исследование качества определения координат. Согласно нормативным документам, исследование включало 66000 итераций, при этом допустимый порог нарушений требований равен 47. По результатам исследования выявлено 36 случаев, в которых качество определения координат ИИС БЛА-ВВП не соответствовало установленным требованиям. Таким образом, для рассмотренного в работе информационного базиса, синтезированный алгоритм КЦ отвечает требованиям качества определения координат RNP0.02.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Описаны обобщённые характеристики и этапы полёта, требования к точности и целостности определения координат БЛА-ВВП и представление искажений измерений АПСН.
2. Для алгоритмов обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений измерений АПСН разработаны:
 - методики формирования входных измерений алгоритмов обнаружения на основе измерений псевдодальностей до НКА рабочего созвездия с учетом динамики БЛА-ВВП и стохастические модели представления областей неопределённости этих измерений.
 - критерии и правила обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений в измерениях псевдодальностей на основе проверки гипотез об отсутствии в измерениях псевдодальностей искажений, приводящих к невозможности обеспечения качества определения координат, и методика расчета порогов для них. При этом в критериях учитывается информация о составе бортового оборудования, динамике полёта БЛА-ВВП, требованиях к точности и целостности навигационного решения, предъявляемые к текущему режиму полета БЛА-ВВП.
3. С применением предложенной процедуры работы ИИС синтезированы алгоритмы КЦ инерциально-спутникового навигационного решения БЛА-ВВП в рамках концепции ГАМ.
4. Предложены методики и разработано программно-математическое обеспечение настройки алгоритмов КЦ под требуемый информационный базис.
5. Предложены экспериментальные методики оценки соответствия разработанных алгоритмов КЦ инерциально-спутникового навигационного решения для БЛА-ВВП требованиям, установленным в информационном базисе, что подтверждает четвертое положение, выносимое на защиту.
6. По результатам обработки информации, полученной при решении задачи настройки алгоритмов КЦ, выявлено, что для выбранного информационного базиса комбинации параметров настройки алгоритма КЦ лежат в диапазоне (5,5, 8,5) для коэффициента усиления алгоритма обнаружения скачкообразного искажения и (40, 45) для размера выборки алгоритма обнаружения медленно нарастающего искажения. Для формирования априорной информации о законе распределения комбинаций параметров настройки алгоритма КЦ, синтезированных в рамках предложенной процедуры, приводится результат аппроксимации информации, полученной при использовании метода Монте-Карло.
7. Проведено исследование влияния характеристик инерциальной части инерциально-спутниковой навигационной системы на результаты настройки алгоритмов КЦ. Показано, что при снижении точностных характеристик ИНС до уровня микромеханических датчиков, алгоритм КЦ сохраняет работоспособность, но при этом не обеспечивается качество

определения координат, заложенное в информационный базис. Также показан пример изменения информационного базиса для решения задачи настройки синтезированного алгоритма КЦ под менее жесткие требования к точности и целостности определения координат при наличии скачкообразных и медленно нарастающих искажений, профиль и интенсивность которых соответствует требованиям нормативных документов гражданской авиации.

8. Проведено исследование свойств синтезированного алгоритма КЦ в условиях воздействия уводящего искажения. Показана принципиальная работоспособность синтезированного в рамках предложенной процедуры алгоритма КЦ при таком виде искажения и определены границы его применимости при выбранном информационном базисе.

Таким образом, решена научно-техническая задача обеспечения качества определения координат беспилотного летательного аппарата при реализации городской аэромобильности с использованием информационно-измерительной системы, включающей методические, алгоритмические и программные средства обеспечения существующих и перспективных требований к точности и целостности определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, включенных в Перечень ВАК РФ:

1. Алгоритм контроля целостности навигационного решения на основе инерциальных и спутниковых измерений / Колганов Л.А., Савкин А.В., Антонов Д.А., Рябинкин М.С., Калинина О.И. // Приборы. — 2023. — № 5(275). — С. 39-45. — EDN IJDHEU.

2. Подход к синтезу алгоритмов контроля целостности инерциально-спутникового навигационного решения для беспилотных летательных аппаратов вертикального взлета и посадки / Л. А. Колганов, Д. А. Антонов, К. С. Лельков, М. С. Рябинкин // Приборы. — 2023. — № 12(282). — С. 39-46. — EDN PEJEDZ.

3. Комбинированный способ решения навигационной задачи с применением системы технического зрения / Савкин А.В., Колганов Л.А., Антонов Д.А., Рябинкин М.С., Ныи Ман Нгуен // Приборы. — 2023. — № 10(280). — С. 19-30. — EDN SVBHWS.

В этих работах личный вклад заключается в применении авторских методических, алгоритмических и программных средств обеспечения качества определения координат на основе инерциальных и спутниковых измерений, включая алгоритм контроля целостности, способ расчета статистических характеристик входных изменений для алгоритма контроля целостности, а также методики исследования качества определения координат для беспилотных летательных аппаратов при реализации городской аэромобильности, изложенных в диссертационной работе.

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных (Scopus):

1. Navigation and motion control systems of the autonomous underwater vehicle / Antonov D., Kolganov L., Savkin A., Chekhov E., Ryabinkin M. // Eureka: Physics and Engineering. — 2020. — No. 4. — P. 38-50. — DOI 10.21303/2461-4262.2020.001361. — EDN RGTFMV.

2. Magnetometer calibration using genetic algorithms / E. L. Chekhov, D. A. Antonov, L. A. Kolganov, A. V. Savkin // TEM Journal. — 2020. — Vol. 9, No. 3. — P. 907-914. — DOI 10.18421/TEM93-10. — EDN ZAWFOW.

Вклад автора заключается в примененных алгоритмических и программных средств обеспечения качества определения координат, изложенных в диссертационной работе.

В других изданиях:

1. Подход к построению алгоритма контроля целостности навигационного обеспечения воздушного судна / Е. Л. Чехов, Л. А. Колганов, П. В. Мигик // Навигация и управление движением : Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 20–23 марта 2018 года / Научный редактор О.А. Степанов. Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. — Санкт-Петербург: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2018. — С. 361-363. — EDN LZQLGP.

2. Исследование влияния возмущающих факторов на свойства комплексной навигационной системы беспилотного летательного аппарата / Л. А. Колганов, В. А. Аверина, А. А. Гаврилюк [и др.] // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : тезисы докладов XXXI Международной научно-технической конференции, Алушта, 14–20 сентября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2022. — С. 132-133. — EDN WVFSED.

3. Исследование характеристик разработанного алгоритма контроля целостности ГНСС при постановке искусственных уводящих помех / А. В. Савкин, Л. А. Колганов, Е. Л. Чехов // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : Сборник аннотаций конкурсных работ XIII Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий, Москва, 22–26 ноября 2021 года. — Москва: Издательство «Перо», 2021. — С. 91-92. — EDN XOWXPI.

Публикации объектов интеллектуальной собственности:

1. Колганов Л.А., Антонов Д.А., Савкин А.В., Рябинкин М.С. Программа контроля скачкообразных и медленно нарастающих искажений измерений псевдодальностей до навигационных космических аппаратов для беспилотных летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024680968. — Дата рег. 03.09.2024.

2. Колганов Л.А., Антонов Д.А., Савкин А.В., Рябинкин М.С. Программа формирования прогноза измерений псевдодальностей до навигационных космических аппаратов для беспилотных летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024680969. — Дата рег. 03.09.2024.

Вклад автора в этих публикациях объектов интеллектуальной собственности заключается в разработке алгоритмического и программного обеспечения обнаружения скачкообразных и медленно нарастающих искажений измерений псевдодальностей и формирования прогноза измерений псевдодальностей для беспилотных летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки, изложенных в диссертационной работе.