

На правах рукописи



Лельков Константин Сергеевич

**ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА НОСИТЕЛЕЙ
КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ НАРУЖНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

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

Научный
руководитель:

Черноморский Александр Исаевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры 305 «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Официальные
оппоненты:

Матвеев Валерий Владимирович,

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборы управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула

Зайцева Наталия Александровна,

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела 911 ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», г. Москва

Защита диссертации состоится «09» декабря 2026 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12, созданного на базе федерального государственного автономного 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=189017

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

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



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для обеспечения штатного функционирования современного аэродрома в условиях непрерывно увеличивающейся интенсивности воздушного движения необходима высокая эффективность проведения всех регламентных работ, в частности работ по обслуживанию воздушных судов (ВС). В этой связи во всём мире ведутся работы по автоматизации процедуры мониторинга дефектов наружной поверхности ВС на стоянке. **Актуальной проблемой является** создание комплекса автоматизированного мониторинга (КАМ) дефектов наружной поверхности ВС (и других стационарных объектов) на основе использования в качестве носителей фотоаппаратуры мониторинга беспилотного летательного аппарата (БЛА) и беспилотного наземного колёсного аппарата (БНКА). Перспективным направлением решения этой проблемы является построение КАМ, включающего БЛА и БНКА, механически и информационно связанные между собой тросовым механизмом (ТМ). При этом БЛА как носитель оптических средств обеспечивает мониторинг верхней части, а БНКА – нижней части наружной поверхности ВС. Наличие гибкой механической связи между БЛА и БНКА в значительной мере способствует обеспечению безопасности процедуры мониторинга на аэродроме, но в то же время предопределяет необходимость скоординированности перемещений БЛА и БНКА по траекториям мониторинга. Наличие информационной связи предопределяет возможность осуществления скоординированной процедуры коррекции измерений навигационных параметров БЛА и БНКА. Автоматизация процедуры мониторинга дефектов наружной поверхности ВС посредством КАМ требует построения специализированной измерительно-управляющей системы (ИУС) носителей фотоаппаратуры в составе КАМ.

Целью диссертационной работы является повышение точности позиционирования и обеспечение синхронности перемещений механически связанных беспилотных наземного и летательного аппаратов как носителей аппаратуры комплекса автоматизированного мониторинга поверхностей стационарных объектов за счёт разработки алгоритмов измерительно-управляющей системы движением носителей.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие научно-практические задачи:

- разработка структуры измерительно-управляющей системы комплекса автоматизированного мониторинга, реализующего мониторинг дефектов поверхностей стационарных объектов;

- построение комплексной математической модели динамики связанных тросовым механизмом носителей комплекса автоматизированного мониторинга на основе модифицированных, в части учёта совокупности возмущающих факторов, математических моделей движения беспилотных наземного колёсного и летательного аппаратов;
- разработка программно-алгоритмического обеспечения подсистем измерений навигационных параметров каждого из носителей комплекса автоматизированного мониторинга и алгоритмов взаимной коррекции процессов измерений в этих подсистемах;
- разработка программно-алгоритмического обеспечения подсистем траекторного управления каждого из носителей комплекса автоматизированного мониторинга и алгоритмов синхронизации процессов формирования управлений в этих подсистемах;
- моделирование, макетирование и экспериментальные исследования измерительно-управляющей системы носителей аппаратуры в составе комплекса автоматизированного мониторинга.

Объект исследования. Измерительно-управляющая система носителей фотоаппаратуры комплекса автоматизированного мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна на стоянке.

Предмет исследования. Алгоритмическое и программное обеспечение подсистем измерения навигационных параметров, подсистем траекторного управления каждого из носителей аппаратуры мониторинга, а также подсистемы управления тросовым механизмом (в составе измерительно-управляющей системы носителей), с обеспечением координации процессов между функционально соответствующими локальными подсистемами носителей.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы методы теоретической механики, теории управления, измерений навигационных параметров, нелинейной фильтрации, а также имитационное моделирование и натурный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенная структура измерительно-управляющей системы связанных тросовым механизмом беспилотных носителей, отличающаяся организацией функциональных связей между её подсистемами, обеспечивает возможности взаимной коррекции подсистем измерения навигационных параметров и

синхронизации подсистем траекторного управления, что в совокупности повышает точность позиционирования носителей;

- математическая модель динамики связанных тросовым механизмом беспилотных наземного колёсного и летательного аппаратов, отличающаяся полнотой учёта характерных возмущающих факторов (порывов ветра, гироскопических моментов, порождаемых вращением винтов, проскальзывания колёс и силового взаимодействия носителей через трос), обеспечивает возможность решения задач определения параметров навигации и траекторного управления движением носителей с точностями, требуемыми для реализации процесса мониторинга;

- разработанные алгоритмы измерения навигационных параметров беспилотных летательного и наземного колёсного аппаратов, отличающиеся включением дополнительно каналов взаимной коррекции по измерениям параметров относительного расположения носителей, обеспечивают требуемые точности определения координат местоположения носителей – 0,3 м и их линейных скоростей – 0,02 м/с;

- разработанные алгоритмы траекторного управления носителями, отличающиеся использованием информации о параметрах движения беспилотных аппаратов относительно текущих путевых точек их траекторий для формирования корректирующих поправок к управляющим сигналам, обеспечивают достижение требуемых точности и синхронности перемещений носителей по заданным траекториям с отклонениями не более 0,43 м и 0,9 с соответственно.

Научная новизна работы.

- Предложена структура измерительно-управляющей системы для беспилотных носителей (наземного колёсного и летательного аппаратов), связанных тросовым механизмом, отличающаяся организацией между её подсистемами функциональных связей, обеспечивающих возможность реализации скоординированных процессов измерения навигационных параметров носителей и формирования сигналов траекторного управления на каждом из них.

- Предложена математическая модель динамики связанных тросовым механизмом беспилотных наземного колёсного и летательного аппаратов, отличающаяся полнотой учёта совокупности воздействующих на аппараты характерных возмущающих факторов: порывов ветра; гироскопических моментов, порождаемых собственным вращением винтов; проскальзывания колёс; силового взаимодействия аппаратов через трос.

- Разработано алгоритмическое обеспечение измерений навигационных параметров беспилотных носителей, отличающееся наличием в алгоритмах дополнительных каналов коррекции по информации об их относительном расположении (поступающей, в частности, от датчиков тросового механизма), обеспечивающих повышение точности позиционирования носителей.

- Разработано алгоритмическое обеспечение траекторного управления носителей, отличающееся использованием дополнительно информации о параметрах движения носителей относительно текущих путевых точек заданных траекторий для формирования корректирующих поправок к потребным скоростям носителей с целью синхронизации их перемещений между путевыми точками.

Практическая значимость результатов, полученных в диссертации и подтверждённых результатами макетирования, моделирования, экспериментальных исследований, заключается в том, что разработанное программно-алгоритмическое обеспечение взаимнокорректируемых подсистем измерения навигационных параметров и синхронизируемых подсистем траекторного управления носителями может быть использовано производителями беспилотных систем для повышения точности позиционирования и эксплуатационной безопасности при создании комплексов автоматизированного мониторинга наружных поверхностей воздушных судов, а также поверхностей других транспортных средств и крупногабаритных инженерных сооружений.

Реализация и внедрение. Результаты научных исследований, полученные при подготовке диссертационной работы, использованы в рамках выполнения НИР «Теория, алгоритмические и программно-аппаратные решения задач навигации и ориентации гетерогенной группы роботов» по проекту № 23-29-00958 российского научного фонда (РНФ) 2023-2024 гг., используются в разработках АО «КТ – Беспилотные системы», а также в учебном процессе кафедры «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» МАИ.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на: международных конференциях «Авиация и космонавтика» в 2020 г., 2023 г., Москва, Россия; конференциях молодых учёных «Навигация и управление движением» в 2021 г., 2022 г., 2024 г., Санкт-Петербург, Россия; юбилейной всероссийской научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке» в 2022 г., Москва, Россия; Санкт-Петербургских международных конференциях по интегрированным навигационным системам в 2022 г., 2023 г., Санкт-Петербург, Россия; международных научных форумах по компьютерным и энергетическим наукам в 2022 г., 2024 г., Алматы, Казахстан;

всероссийской научной конференции «Ульяновский авиационно-промышленный комплекс – 50 лет развития» в 2026 г., Ульяновск, Россия.

Публикации. По теме диссертации Лельковым Константином Сергеевичем опубликовано 28 рецензируемых работ, в том числе: 3 статьи в журналах, включённых в перечень рецензируемых научных изданий ВАК по специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы»; 2 статьи в журналах, включённых в перечень рецензируемых научных изданий ВАК по другим специальностям; 4 статьи в изданиях, включённых в международные реферативные базы данных Scopus или Web of Science; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ; 2 патента на изобретения. В других научных изданиях и материалах конференций опубликовано 15 работ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и шести приложений. Полный объём диссертации составляет 218 страниц с 96 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 50 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются недостатки процедуры «ручного» мониторинга и приведён обзор основных подходов к автоматизированному мониторингу дефектов наружной поверхности ВС. Этих подходы заключаются в использовании отдельных беспилотных аппаратов (наземных или летательных) для локального осмотра частей наружной поверхности ВС. В тоже время, ни один из существующих подходов не обеспечивает возможность единовременного безопасного мониторинга всей наружной поверхности ВС. Создание комплекса единовременного автоматизированного мониторинга дефектов всей наружной поверхности ВС на его стоянке на основе использования в качестве носителей аппаратуры мониторинга БЛА и БНКА, связанных через ТМ механически и информационно, является актуальной проблемой.

В главе 1 определены требования к ИУС носителей: математические ожидания (МО) ошибок определения координат местоположения БЛА и БНКА не должны превышать 0,15 м при СКО этих ошибок – не более 0,05 м; ошибки выдерживания заданных скоростей движения – не более 0,38 м/с для БЛА и 0,25 м/с для БНКА; отклонения носителей от заданных траекторий – не более 0,45 м; длина размотанной части троса – не более 12 м; разность времён достижения носителями путевых точек – не более 3 с.

Предложена процедура перемещений носителей в процессе мониторинга. Её особенностью является разделение перемещений КАМ на участки, на которых

носители перемещаются совместно (БЛА на посадочной площадке БНКА) или на которых носители осуществляют синхронные перемещения по траекториям, содержащим взаимосвязанные (синхронизированные во времени) путевые точки.

Разработана структура ИУС КАМ, включающая подсистемы измерения навигационных параметров (ПИНП), подсистемы траекторного управления (ПТУ) для каждого носителя, а также подсистему управления ТМ. При формировании алгоритмов ИУС предложено использовать информационное и механическое взаимодействие компонентов КАМ. Эти взаимодействия (связи) направлены на координацию процессов определения навигационных параметров БНКА и БЛА, а также процессов формирования их траекторных управлений. Под координацией процессов в ИУС понимается взаимная коррекция ПИНП БЛА и БНКА, а также синхронизация их ПТУ. Взаимная коррекция ПИНП направлена на обеспечение высокой точности определения навигационных параметров носителей фотоаппаратуры КАМ. Синхронизация ПТУ, формирующих управления исполнительными элементами носителей и двигателем лебёдки ТМ, направлена на обеспечение высокой точности траекторного управления и синхронности прохождения путевых точек носителями.

В главе 2 представлены модифицированные математические модели динамики носителей КАМ. Применительно к БЛА – гексакоптеру модель отличается полнотой учёта возмущающих факторов: порывов ветра; скорости набегающего на винт осевого воздушного потока; гироскопических моментов, порождаемых собственным вращением винтов [17]. Применительно к БНКА, представляющему собой четырёхколёсный робот с поворотной осью передней колёсной пары, учтены возмущения, порождаемые продольным и поперечным проскальзываниями колёс относительно подстилающей поверхности аэродрома.

Изложены результаты разработки алгоритма ПИНП БНКА. Определение навигационных параметров БНКА осуществляется на основе измерений одометрической подсистемы (измерений инкрементальных энкодеров и датчиков углов поворота осей вращения передних колёс БНКА), измерений сканирующего лазерного дальномера и курсового микромеханического гироскопа.

Алгоритм ПИНП БНКА разработан на основе модификации фильтра Калмана для нелинейных систем – сигма-поинт фильтра [14]. Это обеспечивает учёт нелинейных связей между компонентами вектора состояния и получение, в частности, оценок параметров проскальзывания колёс БНКА. Применительно к рассматриваемому случаю вектор состояния $\mathbf{X}_g$ системы имеет вид:

$$\mathbf{X}_g = \left[x_{gt}, y_{gt}, \dot{x}_{gt}, \dot{y}_{gt}, \psi_{gt}, \dot{\psi}_{gt}, r_{1eff}, r_{2eff}, r_{3eff}, r_{4eff}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \omega_z \right]^T, \quad (1)$$

где x_{gt}, y_{gt} и $\dot{x}_{gt}, \dot{y}_{gt}$ – координаты местоположения и линейные скорости БНКА соответственно в системе координат (СК) мониторинга $O_t X_t Y_t Z_t$, связанной с ВС; ψ_{gt} и $\dot{\psi}_{gt}$ – угол и угловая скорость курса БНКА соответственно; $r_{1eff}, r_{2eff}, r_{3eff}, r_{4eff}$ и $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – эффективные радиусы качения и углы проскальзывания колёс БНКА; ω_z – сдвиг нуля бортового гироскопа.

При этом компоненты нелинейной функции динамики $f(x)$ в структуре сигма-поинт фильтра, формируемые на основе измерений $\dot{x}_{gt}^{odo}, \dot{y}_{gt}^{odo}, \dot{\psi}_{gt}^{odo}$ одометрической подсистемы, таковы:

$$\begin{aligned} f(x_1) &= x_{gt} + \dot{x}_{gt} dt; f(x_2) = y_{gt} + \dot{y}_{gt} dt; f(x_3) = \dot{x}_{gt}^{odo}; \\ f(x_4) &= \dot{y}_{gt}^{odo}; f(x_5) = \psi_{gt} + \dot{\psi}_{gt} dt; f(x_6) = \dot{\psi}_{gt}^{odo}; \\ f(x_7) &= r_{1eff}; f(x_8) = r_{2eff}; f(x_9) = r_{3eff}; f(x_{10}) = r_{4eff}; \\ f(x_{11}) &= \beta_1; f(x_{12}) = \beta_2; f(x_{13}) = \beta_3; f(x_{14}) = \beta_4; f(x_{15}) = \omega_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Вектор измерений $\mathbf{Z}_g$, поступающих в фильтр, содержит измерения курсового гироскопа $\dot{\psi}_{gt}^{imu}$ (с компенсацией угловой скорости вращения Земли) и сканирующего лазерного дальномера $x_{gt}^{lidar}, y_{gt}^{lidar}, \psi_{gt}^{lidar}$, а также измерения $\dot{\psi}_{gt}^{odo}$ одометрической подсистемы:

$$\mathbf{Z}_g = \left[x_{gt}^{lidar}, y_{gt}^{lidar}, \psi_{gt}^{lidar}, \dot{\psi}_{gt}^{imu}, \dot{\psi}_{gt}^{imu} - \dot{\psi}_{gt}^{odo} \right]^T. \quad (3)$$

Уравнение измерений – линейно, матрица измерений $\mathbf{H}_g$ такова:

$$\mathbf{H}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I}_{2 \times 2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ – единичная матрица.

Оценки элементов вектора состояния (1) формируются на основе соотношений (1)-(4) с использованием собственно алгоритма сигма-поинт фильтра [14].

Представлены результаты разработки алгоритма ПИНП БЛА. Определение навигационных параметров БЛА осуществляется на основе измерений проекций

на оси $O_t X_t Y_t Z_t$: бортовым гироскопом – угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_{at}^{imu} = [\omega_{axt}^{imu}, \omega_{ayt}^{imu}, \omega_{azt}^{imu}]$ БЛА (с учётом компенсации угловой скорости вращения Земли); акселерометром – кажущегося ускорения БЛА $\mathbf{a}_{at}^{imu} = [a_{axt}^{imu}, a_{ayt}^{imu}, a_{azt}^{imu}]$; лазерным высотомером – высоты БЛА z_{at}^{laser} ; приёмником СНС – координат местоположения и путевых скоростей $x_{at}^{gnss}, y_{at}^{gnss}, z_{at}^{gnss}$ и $\dot{x}_{at}^{gnss}, \dot{y}_{at}^{gnss}, \dot{z}_{at}^{gnss}$ БЛА.

Формирование оценок навигационных параметров БЛА ($\hat{x}_{at}, \hat{y}_{at}, \hat{z}_{at}, \hat{\psi}_{at}, \hat{\theta}_{at}, \hat{\gamma}_{at}, \hat{\dot{x}}_{at}, \hat{\dot{y}}_{at}, \hat{\dot{z}}_{at}$) осуществляется на основе использования расширенного фильтра Калмана [2]. В рассматриваемом случае вектор состояния $\mathbf{X}_a$ представляет собой вектор ошибок и имеет вид:

$$\mathbf{X}_a = [\Delta \mathbf{p}_{1 \times 3}, \Delta \mathbf{v}_{1 \times 3}, \Delta \boldsymbol{\theta}_{1 \times 3}, \Delta \mathbf{b}_{1 \times 3}^g, \Delta \mathbf{b}_{1 \times 3}^a]^T, \quad (5)$$

где компоненты вектора состояния – следующие вектора-строки: $\Delta \mathbf{p}_{1 \times 3} = [\Delta x_{at}, \Delta y_{at}, \Delta z_{at}]$ – ошибки определения координат местоположения БЛА в СК $O_t X_t Y_t Z_t$; $\Delta \mathbf{v}_{1 \times 3} = [\Delta \dot{x}_{at}, \Delta \dot{y}_{at}, \Delta \dot{z}_{at}]$ – ошибки определения проекций линейной скорости перемещения БЛА; $\Delta \boldsymbol{\theta}_{1 \times 3} = [\Delta \psi_{at}, \Delta \theta_{at}, \Delta \gamma_{at}]$ – ошибки определения углов ориентации БЛА; $\Delta \mathbf{b}_{1 \times 3}^a = [\Delta a_{x0}, \Delta a_{y0}, \Delta a_{z0}]$ – ошибки определения сдвигов нулей бортового акселерометра БЛА; $\Delta \mathbf{b}_{1 \times 3}^g = [\Delta \omega_{x0}, \Delta \omega_{y0}, \Delta \omega_{z0}]$ – ошибки определения сдвигов нулей бортового гироскопа БЛА.

Матрица Якоби $\mathbf{F}_c$ в уравнении динамики системы ошибок, формируемая на основе измерений инерциальных датчиков, такова:

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\hat{\mathbf{R}}_a^t [\hat{\mathbf{f}} \times] & 0 & -\hat{\mathbf{R}}_a^t \\ 0 & 0 & -[\hat{\boldsymbol{\omega}} \times] & -\mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_g \times \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_a \times \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ – единичная матрица; $\hat{\mathbf{R}}_a^t$ – матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию СК $O_t X_t Y_t Z_t$ относительно СК $O_a X_a Y_a Z_a$, связанной с БЛА; $[\hat{\mathbf{f}} \times]$ и $[\hat{\boldsymbol{\omega}} \times]$ – кососимметричные матрицы, сформированные на основе

векторов $\mathbf{a}_{at}^{imu}$ и $\mathbf{\omega}_{at}^{imu}$ соответственно; τ_a, τ_g – постоянные времени дрейфов акселерометров и гироскопа в модели Гаусса-Маркова первого порядка [3].

Вектор измерений $\mathbf{Z}_a$ ПИНП БЛА содержит измерения приёмника СНС и лазерного высотомера:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_a &= [c\dot{x}_{at}^{gnss}, c\dot{y}_{at}^{gnss}, c\dot{z}_{at}^{gnss}, c\dot{x}_{at}^{gnss}, c\dot{y}_{at}^{gnss}, c\dot{z}_{at}^{gnss}, c\dot{z}_{at}^{laser}]^T; \\ c\dot{x}_{at}^{gnss} &= \dot{x}_{at}^{gnss} - l_{sz} (\cos \psi_{at} \sin \theta_{at} \cos \gamma_{at} + \sin \psi_{at} \sin \gamma_{at}) - \hat{\dot{x}}_{at}; \\ c\dot{y}_{at}^{gnss} &= \dot{y}_{at}^{gnss} - l_{sz} (\sin \psi_{at} \sin \theta_{at} \cos \gamma_{at} - \cos \psi_{at} \sin \gamma_{at}) - \hat{\dot{y}}_{at}; \\ c\dot{z}_{at}^{gnss} &= \dot{z}_{at}^{gnss} - l_{sz} \cos \theta_{at} \cos \gamma_{at} - \hat{\dot{z}}_{at}; \\ c\dot{x}_{at}^{gnss} &= \dot{x}_{at}^{gnss} - \dot{\psi}_{at} l_{sz} (\cos \psi_{at} \sin \gamma_{at} - \sin \psi_{at} \sin \theta_{at} \cos \gamma_{at}) - \\ &\quad - \dot{\theta}_{at} l_{sz} \cos \psi_{at} \cos \theta_{at} \cos \gamma_{at} - \dot{\gamma}_{at} l_{sz} (\sin \psi_{at} \cos \gamma_{at} - \cos \psi_{at} \sin \theta_{at} \sin \gamma_{at}) - \hat{\dot{x}}_{at}; \\ c\dot{y}_{at}^{gnss} &= \dot{y}_{at}^{gnss} - \dot{\psi}_{at} l_{sz} (\cos \psi_{at} \sin \theta_{at} \cos \gamma_{at} + \sin \psi_{at} \sin \gamma_{at}) - \\ &\quad - \dot{\theta}_{at} l_{sz} \sin \psi_{at} \cos \theta_{at} \cos \gamma_{at} + \dot{\gamma}_{at} l_{sz} (\sin \psi_{at} \sin \theta_{at} \sin \gamma_{at} + \cos \psi_{at} \cos \gamma_{at}) - \hat{\dot{y}}_{at}; \\ c\dot{z}_{at}^{gnss} &= \dot{z}_{at}^{gnss} + \dot{\theta}_{at} l_{sz} \sin \theta_{at} \cos \gamma_{at} + \dot{\gamma}_{at} l_{sz} \cos \theta_{at} \sin \gamma_{at} - \hat{\dot{z}}_{at}; \\ c\dot{z}_{at}^{laser} &= \dot{z}_{at}^{laser} - \hat{\dot{z}}_{at}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $c\dot{x}_{at}^{gnss}, c\dot{y}_{at}^{gnss}, c\dot{z}_{at}^{gnss}$ и $c\dot{x}_{at}^{gnss}, c\dot{y}_{at}^{gnss}, c\dot{z}_{at}^{gnss}$ – измерения ошибок определения координат местоположения и линейных скоростей центра масс БЛА приёмником СНС с учётом линейного смещения l_{sz} антенны приёмника вдоль оси $O_a Z_a$ СК $O_a X_a Y_a Z_a$; $c\dot{z}_{at}^{laser}$ – измерение ошибки определения высоты БЛА лазерным высотомером.

Матрица Якоби $\mathbf{H}_a$ в уравнении измерений фильтра имеет вид:

$$\mathbf{H}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 & -\hat{\mathbf{R}}_a^t [\mathbf{l}_{sz} \times] & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} & -\hat{\mathbf{R}}_a^t (\hat{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{l}_{sz}) & 0 & 0 \\ [0 & 0 & 1] & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Оценки элементов вектора состояния (5) формируются на основе соотношений (5)-(8) с использованием собственно алгоритма расширенного фильтра Калмана [2].

Представленные в главе результаты моделирования работы ПИНП БНКА и БЛА подтвердили эффективность разработанных алгоритмов. В то же время полученные точности определения части навигационных параметров носителей (в частности, параметров линейных перемещений БНКА и БЛА) не соответствуют требованиям, предъявляемым к ИУС в целом.

В главе 3 решена задача синтеза алгоритмов ПТУ БНКА и БЛА в едином информационном пространстве – СК мониторинга $O_t X_t Y_t Z_t$. Предложена обобщённая структура ПТУ для компонентов КАМ, состоящая из траекторного и локомоционного контуров (рисунок 1). В траекторном контуре осуществляется определение положения носителя относительно начальной и конечной путевых точек текущего участка траектории с последующим формированием требуемых величин линейных и угловых скоростей движения. Эти скорости поступают на вход локомоционного контура, в котором формируются управляющие сигналы на исполнительные механизмы носителя, обеспечивающие его перемещение по заданной траектории с требуемой точностью.

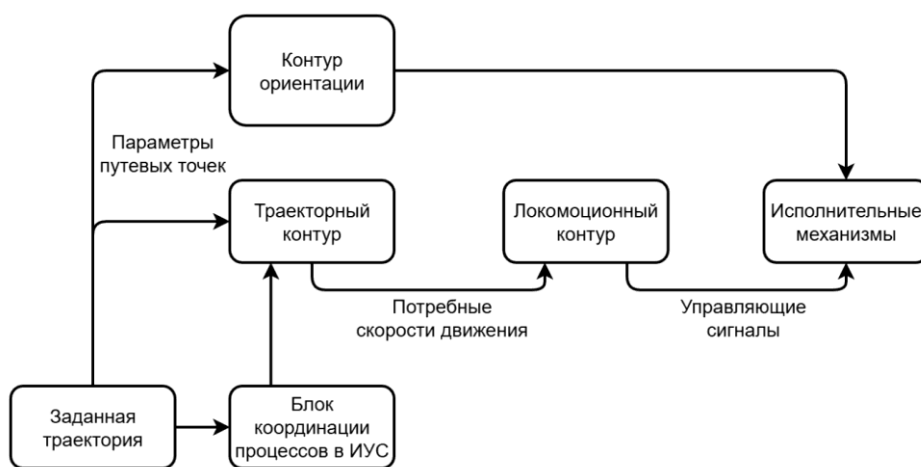


Рисунок 1 – Обобщённая структура ПТУ носителей в составе КАМ

Представлены разработанные алгоритмы подсистем траекторного управления для каждого из носителей. В этих алгоритмах предусмотрена возможность синхронизации ПТУ носителей КАМ посредством сигналов от блока координации процессов в ИУС.

Применительно к реализации ПТУ БНКА траекторный контур управления формируется с использованием нелинейных регуляторов. Законы формирования требуемых величин линейной V_{gr} и угловой $\dot{\psi}_{gr}$ скоростей движения БНКА [8]:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{gr} &= k_{pr} \cdot \Delta\psi_g + k_{dr} \cdot \dot{\psi}_g + k_{cr} \cdot r_n; \\ V_{gr} &= k_{v1} \cdot r_t \cdot e^{-k_{v2}|\Delta\psi_g|} - k_{v3} \cdot r_t \cdot e^{-k_{v4}(|\Delta\psi_g| - \pi/2)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta\psi_g$ – разность между углом ψ_t пеленга на текущую путевую точку и текущим углом курса БНКА; r_t – расстояние от БНКА до текущей путевой точки; r_n – длина нормали из текущего местоположения БНКА к прямой, соединяющей

две соседние путевые точки; $k_{pr}, k_{dr}, k_{cr}, k_{v1}, k_{v2}, k_{v3}, k_{v4}$ – постоянные весовые коэффициенты.

В локомотивном контуре БНКА формируются управляющие сигналы, осуществляющие (через контроллеры и двигатели вращения колёс) регулирование скоростей вращения колёс посредством формирования соответствующих управляющих моментов. При этом управление угловым движением БНКА реализуется путём регулирования углов поворота плоскостей вращения колёс передней колёсной пары посредством формирования соответствующего момента, развиваемого поворотным приводом колёс. Законы формирования собственно управляющих моментов имеют вид:

$$M_i = k_p z_{\dot{\phi}_i} + k_{int} \int z_{\dot{\phi}_i} + k_d \frac{dz_{\dot{\phi}_i}}{dt}, i = 1, 2, 3, 4; M_5 = k_{p\gamma} z_{\gamma} + k_{d\gamma} \frac{dz_{\gamma}}{dt} - k_{p\gamma} \dot{\gamma}_g, \quad (10)$$

где M_i ($i = 1, 2, 3, 4$) и M_5 – моменты, развиваемые соответственно двигателями мотор-колёс и поворотным приводом передней оси колёсной пары БНКА; $k_p, k_{int}, k_d, k_{p\gamma}, k_{d\gamma}, k_{p\gamma}$ – постоянные коэффициенты; $z_{\dot{\phi}_i}$ – невязки потребных угловых скоростей вращений колёс; z_{γ} – невязка потребной угловой скорости разворота; $\dot{\gamma}_g$ – угловая скорость разворота передней оси колёсной пары БНКА.

Применительно к ПТУ БЛА траекторный контур управления содержит линейные ПД регуляторы, на выходе которых – потребные линейные скорости перемещения БЛА:

$$\dot{x}_{ar} = k_{px} z_x + k_{dx} \frac{dz_x}{dt}; \dot{y}_{ar} = k_{py} z_y + k_{dy} \frac{dz_y}{dt}; \dot{z}_{ar} = k_{pz} z_z + k_{dz} \frac{dz_z}{dt}, \quad (11)$$

где z_x, z_y, z_z – невязки перемещений БЛА вдоль осей СК мониторинга $O_t X_t Y_t Z_t$; $k_{px}, k_{py}, k_{pz}, k_{dx}, k_{dy}, k_{dz}$ – постоянные коэффициенты.

Синтез алгоритмов локомотивного контура ПТУ БЛА осуществлён на основе метода управления Кокотовича – «управление путём последовательных возвратов». Этот метод обеспечивает формирование управляющих сигналов на основе потребного вектора управления U БЛА, который соответствует текущим потребным скоростям (11). Он имеет вид [2]:

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{m_a}{\cos \theta_{at} \cos \gamma_{at}} \left(-k_6 z_{\dot{z}} + n_6 \ddot{z}_{at} + g + \frac{A_3}{m_a} + \frac{F_{wz}}{m_a} + \frac{2}{m_a} (\dot{\theta}_{at} \dot{x}_{at} - \dot{\gamma}_{at} \dot{y}_{at}) \right); \\
U_2 &= I_z k_7 \dot{z}_{\psi} - A_4 - \dot{\gamma}_{at} \dot{\theta}_{at} (I_x - I_y) + k_8 z_{\dot{\psi}}; \\
U_3 &= I_y k_9 \dot{z}_{\theta} - A_5 - \dot{\psi}_{at} \dot{\gamma}_{at} (I_z - I_x) + I_R \dot{\gamma}_{at} G_r + I_y k_{10} z_{\dot{\theta}}; \\
U_4 &= I_x k_{11} \dot{z}_{\gamma} - \dot{\theta}_{at} \dot{\psi}_{at} (I_y - I_z) - A_6 - I_r \dot{\theta}_{at} G_r + I_x k_{12} z_{\dot{\gamma}},
\end{aligned} \tag{12}$$

где U_1 – потребная подъёмная сила БЛА; U_2, U_3, U_4 – потребные моменты разворота по курсу, тангажу, крену соответственно; m_a – масса БЛА; I_x, I_y, I_z – главные моменты инерции БЛА; I_R – момент инерции ротора двигателя БЛА; g – ускорение свободного падения; F_{wz} – проекция силы ветра на вертикальную ось; A_3, A_4, A_5, A_6 – аэродинамические силы и моменты; G_r – суммарная угловая скорость вращения винтов; $z_{\dot{\psi}}, z_{\dot{\theta}}, z_{\dot{\gamma}}$ – невязки по углам курса, тангажа, крена; k_i , ($i = 6, \dots, 12$) – постоянные коэффициенты.

На основе (12), в свою очередь, рассчитываются потребные тяги винтов БЛА и собственно управляющие сигналы на выходе локомоторного контура ПТУ БЛА [2].

В главе 4 решена задача координации процессов в ИУС. Решение осуществляется по следующим направлениям: коррекция навигационных решений на борту каждого из носителей КАМ на основе использования информации об их относительном расположении; синхронизация траекторных перемещений БЛА и БНКА на основе использования перекрёстной навигационной информации об их перемещениях по заданным траекториям; управление ТМ с целью исключения провисания троса и ограничения перемещений БЛА относительно БНКА.

Задача управления ТМ при этом сводится к поддержанию троса в слабо натянутом состоянии с выдерживанием длины троса, равной с одной стороны – расстоянию между БЛА и БНКА (для исключения провисания троса), с другой стороны – величине, не превышающей максимально допустимого уровня, в рамках которого исключается возможность столкновения БЛА с поверхностью ВС. Принято, что сила натяжения троса $F_t(l_t)$ не должна превышать $F_{t0} = 1$ Н, что на два порядка менее сил, развиваемых винтомоторной группой БЛА (максимальная тяга – 73.5 Н). В этом случае трос не оказывает значимого влияния на динамику БЛА в штатном режиме работы.

Применительно к предложенной в работе модели динамики ТМ [3] используется следующий закон управления им [7]:

$$M_{tm} = k_{ptm} \cdot (l_{td} - l_t) - k_{dtm} \cdot \dot{l}_t + k_{itm} \int l_t dt + k_{ftm} \cdot (F_{t0} - F_t(l_t)), \quad (13)$$

где l_{td} и l_t – потребная и текущая длины размотанной части троса соответственно; $F_t(l_t)$ – сила натяжения троса (как функция его длины); F_{t0} – номинальное значение силы натяжения; $k_{ptm}, k_{itm}, k_{dtm}$ – постоянные коэффициенты.

Представлены математические модели динамики БЛА и БНКА, модифицированные с учётом наличия силы натяжения троса [3].

При реализации взаимной коррекции ПИНП БЛА и БНКА в качестве источников информации об их относительном расположении используются датчики ТМ, которые обеспечивают измерения длины размотанной части троса и угла η , фактически являющегося углом пеленга БНКА по направлению на БЛА в горизонтальной плоскости. Кроме того, БЛА оснащён оптической камерой, направленной вертикально «вниз». На основе информации от этой камеры с использованием алгоритмов подсистемы технического зрения определяется пространственное смещение БЛА относительно БНКА. При этом возможность измерения относительной высоты полёта БЛА над посадочной площадкой БНКА обеспечивается за счёт нанесенной специальной разметки – ARUCO-меток на посадочной площадке. Эта информация используется для коррекции ПИНП БЛА в процессе взлёта и посадки. Модифицированные (с учётом взаимной коррекции подсистем) вектора измерений (7) в ПИНП БЛА и (3) в ПИНП БНКА таковы [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_g &= \left[x_{gt}^{lidar}, y_{gt}^{lidar}, \psi_{gt}^{lidar}, \dot{\psi}_{gt}^{imu}, \dot{\psi}_{gt}^{imu} - \dot{\psi}_{gt}^{odo}, x_{gt}^{tether}, y_{gt}^{tether} \right]^T; \\ \mathbf{Z}_a &= \left[c x_{at}^{gnss}, c y_{at}^{gnss}, c z_{at}^{gnss}, c \dot{x}_{at}^{gnss}, c \dot{y}_{at}^{gnss}, c \dot{z}_{at}^{gnss}, c z_{at}^{laser}, \right. \\ &\quad \left. c x_{at}^{tether}, c y_{at}^{tether}, c z_{at}^{tether}, c x_{at}^{cam}, c y_{at}^{cam}, c z_{at}^{cam}, c \psi_{at}^{cam} \right]^T, \end{aligned} \quad (14)$$

где $x_{gt}^{tether}, y_{gt}^{tether}$ – координаты местоположения БНКА, рассчитываемые по измерениям датчиков ТМ; $c x_{at}^{tether}, c y_{at}^{tether}, c z_{at}^{tether}$ – ошибки определения координат местоположения БЛА, рассчитываемые на основе измерений датчиков ТМ; $c x_{at}^{cam}, c y_{at}^{cam}, c z_{at}^{cam}, c \psi_{at}^{cam}$ – ошибки определения координат местоположения и угла курса БЛА, рассчитываемые на основе измерений подсистемы технического зрения на его борту.

Модифицированные вектора измерений (14) и соответствующие им расширенные матрицы измерений используются в структурах фильтров ПИНП БЛА и БНКА для реализации взаимной коррекции этих подсистем. Процессы

определения оценок элементов векторов состояния остаются аналогичными этим процессам, реализуемым в ПИНП без взаимной коррекции.

Синхронизация перемещений носителей осуществляется путём коррекции потребных величин их линейных скоростей, вырабатываемых соответствующими траекторными контурами ПТУ носителей КАМ на основе информации, поступающей от блока синхронизации процессов в ИУС. Структура объединённой ПТУ КАМ представлена на рисунке 2. При наличии прогнозируемой разницы времён достижения носителями текущих путевых точек в блоке синхронизации формируются поправки для направленной корректировки скоростей движения носителей (увеличения скорости одного аппарата и уменьшения скорости другого). Скорректированные скорости обеспечивают одновременность достижения соответствующих путевых точек обоими носителями КАМ.

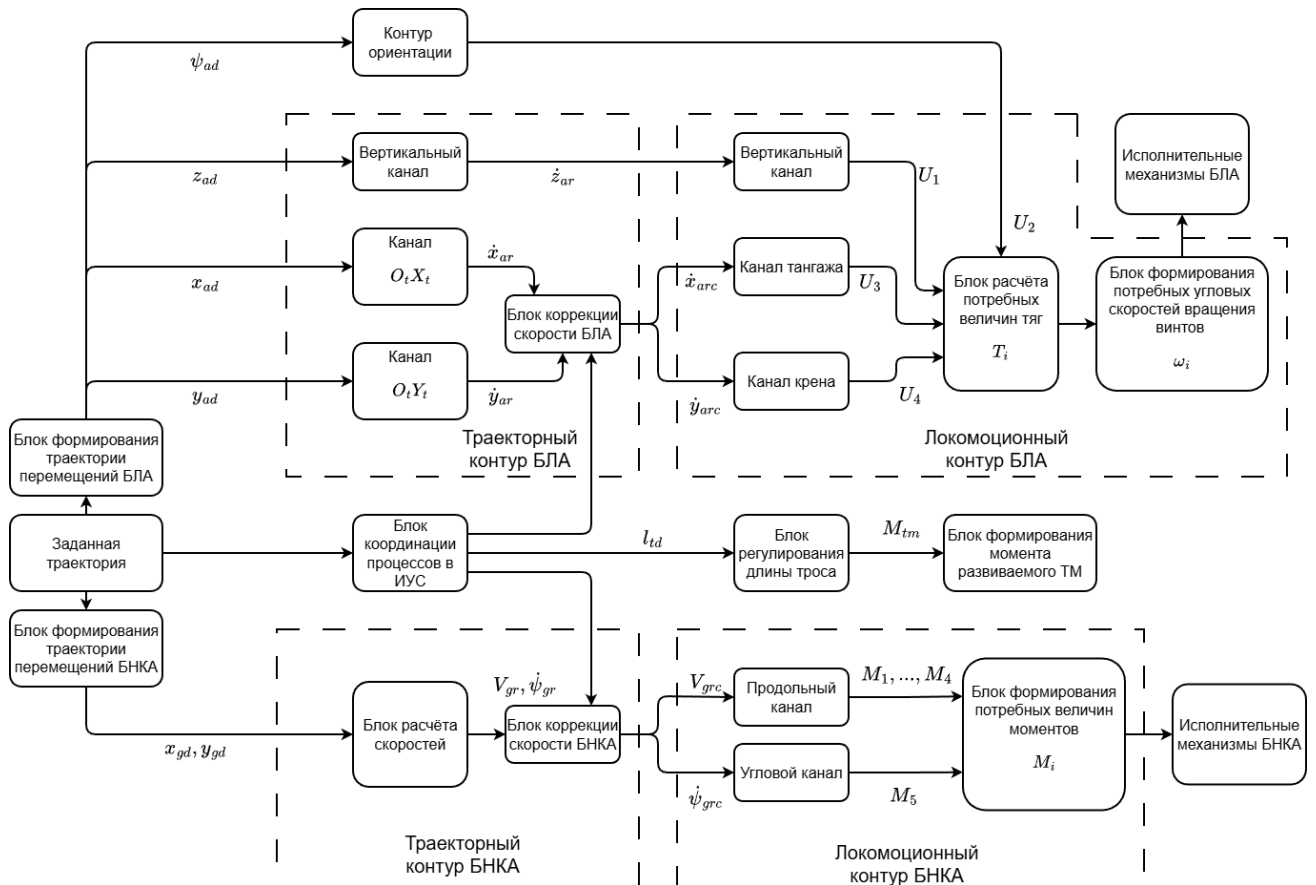


Рисунок 2 – Структура объединённой ПТУ КАМ (x_{ad}, y_{ad}, z_{ad} и x_{gd}, y_{gd} – целевые значения координат местоположения БЛА и БНКА в СК мониторинга; $\dot{x}_{arc}, \dot{y}_{arc}$ и $V_{grc}, \dot{\psi}_{grc}$ – скорректированные скорости перемещений БЛА и БНКА)

Представленные в работе результаты имитационного моделирования подтверждают возможность удовлетворения сформулированным в работе

требованиям к ИУС. МО ошибок определения координат местоположений БНКА и БЛА составили 0,14 м и 0,125 м соответственно, а СКО этих ошибок – 0,023 м и 0,029 м. При этом МО ошибок определения линейных скоростей перемещений БНКА и БЛА составили 0,019 м/с и 0,019 м/с. СКО этих ошибок – 0,007 м/с и 0,008 м/с соответственно. Средняя разница времён достижения путевых точек составила 0,97 с. Максимальные отклонения перемещений БНКА и БЛА от заданных траекторий – 0,43 м и 0,35 м соответственно. В процессе этих перемещений максимальная длина троса составила 11,56 м.

В главе 5 представлены результаты разработки и экспериментальных исследований макета ИУС КАМ. Макет (рисунок 3) разработан и изготовлен на кафедре 305 МАИ (совместно с ООО “Статус Консалт”) при участии автора.

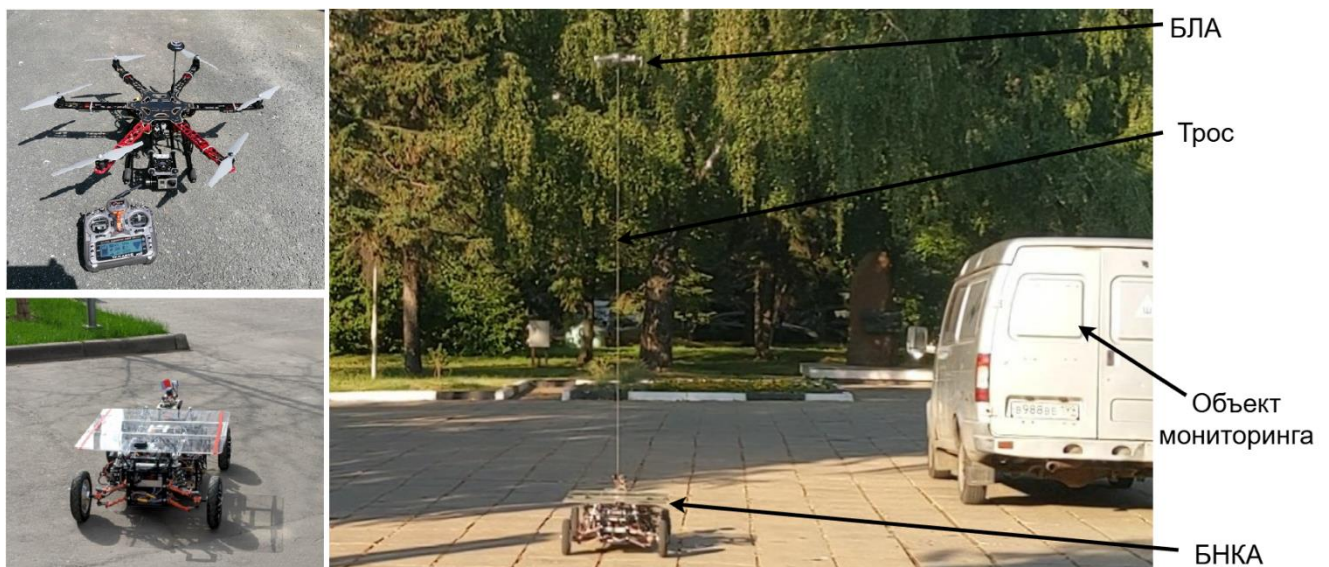


Рисунок 3 – Расположение компонентов КАМ в процессе эксперимента

В процессе экспериментальных исследований осуществлялись скоординированные перемещения БЛА и БНКА вокруг стационарного объекта мониторинга (автомобиль ГАЗ «Соболь») по замкнутым траекториям, содержащим размеченные путевые точки. По достижении БЛА или БНКА каждой текущей путевой точки соответствующий носитель ожидает достижения этой точки другим носителем. Затем осуществляется скоординированное перемещение носителей КАМ к следующей путевой точке. Координаты путевых точек определены приёмником СНС Ublox F9P, функционирующим в RTK режиме с использованием станции дифференциальной коррекции. Используемые группировки спутников – GPS и ГЛОНАСС. Частота измерений – 1 Гц. С целью анализа результатов эксперимента в качестве эталонной системы определения навигационных параметров носителей использовались дополнительные приёмники СНС Ublox-F9P, установленные на БЛА, а также на БНКА, и работающие в RTK режиме измерений. Источником информации о длине

размотанной части троса являлся инкрементальный энкодер на барабане лебёдки ТМ. В предоставленных условиях эксперимента отсутствовала возможность осуществления коррекции ПИНП БНКА по измерениям сканирующего дальномера (в силу специфики конструкции объекта мониторинга), что ограничивало в эксперименте возможности ИУС по позиционированию носителей КАМ относительно объекта мониторинга с требуемой точностью. В этой связи анализ результатов эксперимента был проведен сравнительно с результатами имитационного моделирования по дополнительному сценарию, соответствующему условиям ограниченного эксперимента (отсутствуют измерения сканирующего дальномера).

Полученные в процессе экспериментальных исследований результаты измерений и оценок таковы: максимальные отклонения БНКА и БЛА от заданных траекторий составили 0,67 м и 0,75 м соответственно; средняя разница времён достижения путевых точек – 1,32 с; средние скорости перемещений БНКА и БЛА (по измерениям RTK СНС) – 0,35 м/с и 0,28 м/с; МО ошибок определения линейных скоростей перемещений БНКА и БЛА – 0,07 м/с и 0,1 м/с; СКО ошибок определения линейных скоростей перемещений БНКА и БЛА – 0,02 м/с и 0,06 м/с; МО ошибок оценок координат местоположения БНКА и БЛА (по измерениям RTK СНС и ИУС) – 0,32 м и 0,42 м; СКО ошибок оценок координат местоположения БНКА и БЛА – 0,17 м и 0,14 м; максимальное значение длины размотанной части троса в процессе испытаний – 7,74 м. Полученные результаты соответствуют результатам имитационного моделирования по дополнительному сценарию, что позволяет сделать вывод об экспериментальном подтверждении полученных в работе теоретических результатов.

В приложениях представлены: А – результаты идентификации моделей ошибок измерений бортовых датчиков БЛА и БНКА; Б – результаты моделирования ПИНП БЛА и БНКА в части оценок параметров проскальзывания колёс БНКА и смещений нулей инерциальных датчиков; В – результаты синтеза законов управления в локомоционном контуре ПТУ БЛА; Г – программные реализации алгоритмов ИУС; Д – оценки влияния возмущающих факторов на точность работы ИУС; Е – технические характеристики аппаратного обеспечения макета ИУС КАМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана структура измерительно-управляющей системы носителей (в составе КАМ) фотоаппаратуры мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна с возможностью обеспечения координации процессов

определения навигационных параметров и процессов формирования траекторных управлений носителями, связанными тросовым механизмом.

2. Предложена математическая модель динамики связанных тросовым механизмом носителей КАМ, обеспечивающая полноту учёта влияния совокупности возмущающих факторов на динамику, что, в свою очередь, обеспечило возможность решения задач определения параметров навигации и траекторного управления движением носителей с достижением точностей, требуемых для реализации процесса мониторинга.

3. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение подсистем измерения навигационных параметров БНКА и БЛА со взаимной коррекцией процессов в этих подсистемах на основе информации о взаимном расположении носителей, что обеспечило требуемую точность получения оценок навигационных параметров носителей в составе КАМ.

4. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение подсистем траекторного управления БНКА и БЛА с синхронизацией процессов в этих подсистемах, обеспечивающее с требуемой точностью позиционирование, выдерживание скоростей и синхронизацию перемещений носителей по их траекториям в процессе мониторинга.

5. Осуществлено имитационное моделирование работы измерительно-управляющей системы связанных тросом носителей в составе КАМ с использованием разработанных алгоритмов скоординированных процессов определения навигационных параметров носителей и траекторного управления ими. Результаты моделирования свидетельствуют о повышении точности позиционирования носителей и о выполнении соответствующих требований, предъявляемых к ИУС в процессе перемещений носителей по траекториям мониторинга дефектов наружной поверхности ВС на его аэродромной стоянке.

6. Разработано программное обеспечение и сформирована аппаратная реализация макета измерительно-управляющей системы носителей в составе КАМ, проведены его экспериментальные исследования, которые подтвердили эффективность принятых технических решений.

Таким образом, в диссертации подтверждены защищаемые положения и получены научно-обоснованные решения по повышению точности позиционирования и обеспечению синхронности перемещений механически связанных беспилотных наземного и летательного аппаратов за счёт разработки алгоритмов измерительно-управляющей системы носителей аппаратуры комплекса автоматизированного мониторинга поверхностей стационарных

объектов на примере измерительно-управляющей системы носителей комплекса мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна на его стоянке.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.11:

1. Колганов, Л. А. 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.

2. Лельков, К. С. Система траекторного управления движением гексакоптера / К. С. Лельков, А. И. Черноморский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68., № 1. – С. 36-49. – DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-36-49.

3. Лельков, К. С. Совместная навигация гетерогенной группы роботов. / К. С. Лельков, В. А. Петрухин, А. И. Черноморский, Т. С. Хорев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2026. – № 14 (7). – DOI: 10.26102/2310-6018/2026.58.7.005.

Статьи в рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК РФ по другим специальностям:

4. Алешин, Б. С. Навигация наземного колесного робота в инфраструктуре аэродрома / Б. С. Алешин, А. И. Черноморский, В. А. Петрухин, К. С. Лельков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 293–302. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-293-294.

5. Алешин, Б. С. Управление ориентацией фотокамеры на борту беспилотного летательного аппарата в процессе мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна / Б. С. Алешин, А. И. Черноморский, В. А. Петрухин, К. С. Лельков // Авиакосмическое приборостроение. – 2025. – № 9. – С. 26–36. – DOI: 10.25791/aviakosmos.9.2025.1505.

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

6. Chernomorsky, A. I. About One way to increase the accuracy of navigation system for ground wheeled robot used in aircraft parking / A. I. Chernomorsky, K. S. Lelkov, E. D. Kuris // Smart Science. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 219–226. – DOI: 10.1080/23080477.2020.1824055.

7. Aleshin, B. S. Robotic complex for inspection of the outer surface of the aircraft in its parking lot / B. S. Aleshin, A. I. Chernomorsky, E. D. Kuris, K. S. Lelkov, M. V. Ivakin // INCAS Bulletin. – 2020. – Vol. 12. – P. 21–31. – DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.2.

8. Lelkov, K. S. Cooperative Navigation for Ground and Aerial Robots / K. S. Lelkov, A. I. Chernomorsky // Journal of Electrical Systems. – 2024. – Vol. 20, No. 11. – P. 561–574.

9. Kuris, E. Methodology for Controlling Unmanned Aerial Vehicle Landing on a Ground Wheeled Robot Tethered by Cable / E. Kuris, K. Lelkov, T. Khorev // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2025. – Vol. 17. – P. e1225. – DOI: 10.1590/jatm.v17.1372.

Публикации в других научных изданиях и материалах международных и всероссийских конференций:

10. Черноморский, А. И. Мобильный роботизированный комплекс для мониторинга повреждений наружной поверхности воздушного судна на его стоянке / А. И. Черноморский, Э. Д. Курис, К. С. Лельков // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции. – Москва, 2020. – С. 70–71.

11. Алёшин, Б. С. Диагностический комплекс на основе физически связанных беспилотного летательного аппарата и наземного колёсного робота для мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна / Б. С. Алёшин, К. С. Лельков [и др.] // Авиация и космонавтика : тезисы 19-й Международной конференции. – Москва, 2020. – С. 73–74.

12. Банников, А. В. Навигация роботизированной системы мониторинга дефектов наружной поверхности воздушного судна на его стоянке / А. В. Банников, К. С. Лельков // Навигация и управление движением : материалы XXIII конференции молодых учёных с международным участием. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 82–84.

13. Алёшин, Б. С. Робототехнический комплекс для осмотра воздушного судна на его стоянке / Б. С. Алёшин, К. С. Лельков [и др.] // Перспективные системы и задачи управления : материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодёжной школы-семинара. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 116–118.

14. Лельков, К. С. Комплексная навигационная система наземного колёсного робота // Навигация и управление движением : материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием – Санкт-Петербург, 2022. – С. 205–209.

15. Лельков, К. С. Роботизированный комплекс для мониторинга воздушного судна на его стоянке / К. С. Лельков, А. И. Черноморский // *Авиационные системы в XXI веке : тезисы докладов юбилейной Всероссийской научно-технической конференции.* – Москва, 2022. – С. 274–275.

16. Лельков, К. С. Комплексная навигационная система наземного колёсного робота / К. С. Лельков, А. И. Черноморский // *XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сборник материалов.* – Санкт-Петербург, 2022. – С. 50–53.

17. Lelkov, K. S. Hex-rotor aircraft dynamics and simulation // *IV International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES II 2022) : AIP Conference Proceedings*, 2023. – Т. 2948, № 1. – P. 020015. – DOI: 10.1063/5.0165369.

18. Петрухин, В. А. Локальная навигация колёсного мобильного робота как носителя аппаратуры мониторинга дефектов воздушного судна на его стоянке / В. А. Петрухин, К. С. Лельков, А. И. Черноморский // *XXX юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сборник материалов конференции.* – Санкт-Петербург, 2023. – С. 85–90.

19. Лельков, К. С. Система траекторного управления движением гексакоптера // *Навигация и управление движением : материалы XXVI конференции молодых ученых с международным участием.* – Санкт-Петербург, 2024. – С. 317–319.

20. Lelkov, K. Trajectory control method for hex-rotor UAV // *VI International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES 2024) : E3S Web of Conferences*, 2024. – Т. 542. – P. 06002. – DOI: 10.1051/e3sconf/202454206002.

21. Алёшин, Б. С. Интеллектуальная система управления роботизированным комплексом / Б. С. Алёшин, К. С. Лельков [и др.] // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : тезисы докладов XXXI Международной научно-технической конференции.* – Москва, 2022. – С. 29–29.

22. Алёшин, Б. С. Система технического зрения для обнаружения дефектов наружной поверхности воздушного судна / Б. С. Алёшин, К. С. Лельков [и др.] // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : тезисы докладов XXXI Международной научно-технической конференции.* – Москва, 2022. – С. 75–75.

23. Алешин, Б. С. Разработка навигационно-управляющего комплекса робототехнической колесной транспортной платформы / Б. С. Алешин, К. С. Лельков [и др.] // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и*

обработки информации : тезисы докладов XXXI Международной научно-технической конференции. – Москва, 2022. – С. 121–121.

24. Лельков, К. С. Совместная навигация гетерогенной группы роботов / К. С. Лельков, А. И. Черноморский // Авиация и космонавтика : тезисы 22-ой Международной конференции. – Москва, 2023. – С. 150–151.

В этих публикациях личный вклад автора заключается в разработке: авторских методических, алгоритмических и программных средств обеспечения высокого качества определения навигационных параметров и траекторного управления наземным и летательным аппаратами; математических моделей этих беспилотных аппаратов; в моделировании работы предложенных алгоритмов.

Публикации объектов интеллектуальной собственности:

25. Способ диагностического осмотра наружной поверхности воздушного судна на стоянке с помощью роботизированного комплекса : пат. 2779019 Рос. Федерация, МПК G01M 99/00 / Алёшин Б. С., Черноморский А. И., Егоров А. А., Курис Э. Д., Сурков Д. А., Шумов М. Б., Лельков К. С., Петрухин В. А., Хорев Т. С., Васильев Н. М. ; заявитель и патентообладатель – ООО "Статус Консалт". – № 2019131594 ; заявл. 08.10.2019 ; опубл. 30.08.2022, Бюл. № 25. – 10 с.

26. Способ автоматического формирования пути и скорости движения роботизированного колесного подвижного объекта : пат. 2816411 Рос. Федерация, МПК G05D 1/02 / Алёшин Б. С., Черноморский А. И., Курис Э. Д., Шумов М. Б., Лельков К. С., Петрухин В. А. ; заявитель и патентообладатель – ООО "Статус Консалт". – № 2023119098 ; заявл. 19.07.2023 ; опубл. 28.03.2024, Бюл. № 10. – 8 с.

27. Лельков, К. С. Программа расчёта оценок параметров навигации беспилотного летательного аппарата : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026612084 Рос. Федерация / Лельков К. С. ; правообладатель Лельков К. С. – Заявка № 2026610000 ; дата рег. 26.01.2026. – 1 с.

28. Лельков, К. С. Программа расчёта оценок навигационных и кинематических параметров движения четырёхколёсного робота : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026612148 Рос. Федерация / Лельков К. С. ; правообладатель Лельков К. С. – Заявка № 2026610000 ; дата рег. 26.01.2026. – 1 с.

Вклад автора в этих публикациях объектов интеллектуальной собственности заключается в разработке алгоритмического и программного обеспечения измерительно-управляющих систем беспилотных наземного и летательного аппаратов.