

На правах рукописи

УДК 527.5

Максимов Владимир Николаевич

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ
И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМЫ
ОДНООСНОГО КОЛЕСНОГО МОДУЛЯ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА АЭРОДРОМНОЙ
НАЗЕМНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Специальность 05.11.03 — Приборы навигации

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) на кафедре автоматизированных комплексов систем ориентации и навигации

Научный руководитель: **Черноморский Александр Исаевич**
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматизированных
комплексов систем ориентации и навигации,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты: **Голован Андрей Андреевич**,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией управления
и навигации,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова
Савельев Валерий Викторович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой приборов
и биотехнических систем,
Тульский государственный университет

Ведущая организация: Московский институт электромеханики и автоматики, г. Москва

Защита состоится **DD MM 2016 г. в 10 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан **DD MM 2016 года**.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.141.19, к. ф-м. н.

Семеренко Денис Алексеевич

Общая характеристика работы

Актуальность работы Мониторинг наземной аэродромной инфраструктуры, необходимый для обеспечения функционирования современного аэродрома, включает несколько основных направлений: мониторинг уклонов аэродромных покрытий; мониторинг рабочей инфраструктуры на поверхности аэродрома и другие. К общим недостаткам используемых в настоящее время средств мониторинга можно отнести: привлечение ручных средств; неавтономность большинства из них; ограниченную мобильность носителей аппаратуры мониторинга. В то же время, уровень развития современной компактной измерительной аппаратуры позволяет ставить вопрос о создании мобильного, автономного монитора, состоящего из носителя и аппаратуры мониторинга. Носитель занимает центральное место в обеспечении свойств мобильности и автономности монитора. Одноосный колесный модуль (ОКМ) является одним из перспективных вариантов такого носителя. ОКМ включает стабилизированную вблизи плоскости горизонта приборную платформу, обладающую за счет размещенной на ней аппаратуры естественной верхней маятникостью и установленную на два соосных колеса. ОКМ по существу представляет собой одноосный гирокопический стабилизатор с осью стабилизации, совпадающей с осью колесной пары, где в качестве основного исполнительного элемента используется система инерционной стабилизации. Этот факт максимально упрощает конструкцию ОКМ и устраниет необходимость установки на ОКМ дополнительной стабилизированной платформы.

Созданием различных ОКМ, а также разработкой систем их навигации и управления занимается ряд организаций. Так, в МГУ им. М.В. Ломоносова авторами Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальским, В.Н. Белотеловым, А.В. Ленским получены динамические модели движения неустойчивых одно- и двухколесных аппаратов, синтезированы многоконтурные системы управления для них. Комплексные системы навигации для колесных транспортных средств, построенные на базе одометров и инерциальных датчиков, исследованы А.А. Голованом и И.В. Никитиным. В университете Stanford для ОКМ Segway RMP, оснащенного микромеханическими инерциальными датчиками и сканирующим лазерным дальномером, разработаны навигационные алгоритмы, формирующие маршруты перемещения ОКМ на автономно построенной структурной карте местности (S. Thrun, M. Montemerlo). Разработки ОКМ ведутся также в ИПМ им. М.В. Келдыша, Massachussets Institute of Technology.

Однако, известные работы, посвященные исследованию ОКМ, затрагивают лишь отдельные вопросы его навигации, обеспечения мобильности и автономности. В то же время для эффективного использования ОКМ как носителя аппаратуры автономного мобильного монитора необходимо совместное решение этих взаимосвязанных вопросов, которое может быть получено в рамках построения комплексной системы навигации ОКМ, оценивающей его навигационные параметры и параллельно осуществляющей мониторинг

наземной аэродромной инфраструктуры. В связи с этим построение специализированной комплексной системы навигации ОКМ со стабилизированной приборной платформой является актуальной научно-технической проблемой.

Целью диссертации является разработка и исследование комплексной системы навигации и стабилизации платформы одноосного колесного модуля, используемого в качестве носителя аппаратуры монитора аэродромной наземной инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Сформированы принципы построения комплексной системы навигации управляемого ОКМ со стабилизированной приборной платформой как носителя аппаратуры монитора наземной аэродромной инфраструктуры.
2. Построена аффинная математическая модель динамики движения неголономного ОКМ.
3. Синтезирована система управления движением ОКМ, обеспечивающая его выход на заданную пространственно-временную траекторию и движение по ней с одновременной стабилизацией платформы ОКМ вблизи плоскости горизонта.
4. Разработаны и исследованы алгоритмы комплексной системы навигации одноосного колесного модуля в аэродромной инфраструктуре.
5. Для группы одноосных колесных модулей, совместно осуществляющих мониторинг, построен алгоритм распределенной позиционной системы навигации.
6. Разработан алгоритм функционирования микромеханической курсовертикали, не возмущаемой силами инерции, как измерителя угловой ориентации платформы ОКМ.
7. Проведены моделирование, макетирование и экспериментальные исследования ОКМ, подтвердившие возможность достижения заданных точностных характеристик комплексной системы навигации и стабилизации платформы ОКМ.

Объектом исследования в диссертации является комплексная система навигации ОКМ со стабилизированной приборной платформой.

Предметом исследования является принцип построения комплексной системы навигации управляемого ОКМ со стабилизированной приборной платформой.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теоретической механики, нелинейной теории управления, нелинейной фильтрации, имитационного моделирования.

Научная новизна

1. Создана аффинная математическая модель динамики движения ОКМ с приборной платформой, учитывающая его особенности как неголономного объекта.

2. Разработан новый метод комплексирования источников навигационной информации, обеспечивающий автономное функционирование ОКМ на продолжительных интервалах времени.
3. Предложен принцип построения распределенной позиционной системы навигации группы ОКМ, перемещающихся в инфраструктуре с известными границами.

Практическая значимость результатов, полученных в диссертации, заключается в том, что предложенные в работе алгоритмы комплексной системы навигации ОКМ, алгоритмы распределенной системы навигации группы ОКМ, алгоритм микромеханической курсовертикали, не возмущаемой силами инерции, могут быть использованы производителями аппаратуры мониторинга наземной аэродромной инфраструктуры, а также разработчиками навигационных систем для широкого круга объектов, в частности наземных автономных колесных носителей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм функционирования комплексной системы навигации ОКМ, использующий информацию от микромеханической БИНС, панорамные изображения от видеокамеры и учитывающий особенности неголономной динамики ОКМ, обеспечивает его автономную работу на продолжительных интервалах времени.
2. Синтезированная система управления ОКМ обеспечивает его выход на заданную траекторию из любой точки подстилающей поверхности и одновременную стабилизацию приборной платформы вблизи плоскости горизонта.
3. Применение в составе группы ОКМ, охваченной распределенной позиционной системой навигации, опорных модулей с высокоточным навигационным оборудованием обеспечивает формирование оценок навигационных параметров каждого из модулей группы на уровне оценок для опорных модулей.
4. Алгоритм функционирования микромеханической курсовертикали, в котором коррекция инерционных возмущений в каналах акселерометров осуществляется с использованием информации о неголономных ограничениях на параметры движения ОКМ, обеспечивает существенное уменьшение ошибок определения угловой ориентации платформы ОКМ при его ускоренном перемещении.

Достоверность полученных результатов подтверждена соответствием результатов теоретического анализа и математического моделирования алгоритмов комплексной системы навигации управляемого ОКМ с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований разработанного макета ОКМ.

Реализация и внедрение результатов. Полученные в работе результаты использованы в Московском авиационном институте (МАИ) при выполнении НИР в рамках государственного задания «Разработка и исследование

принципов построения ОКМ для обеспечения мониторинга и безопасности аэродромного комплекса беспилотных летательных аппаратов», в ОАО «РАМПОРТ» при моделировании мониторинга аэродромных покрытий, в ФГУП ОКБ Океанической техники РАН при выполнении ОКР, в учебном процессе кафедры автоматизированных комплексов систем ориентации и навигации МАИ.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на четырех международных конференциях (XIX международной конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». Алушта, 2010; I международной конференции «Автоматизация управления, интеллектуальные системы и среды». Нальчик, 2010; IV, VI международных конференциях «Indoor Positioning and Indoor Navigation». Монбельяр (Франция), 2013; Банфф (Канада), 2015), на трех Всероссийских научно-технических конференциях (X конференции «Навигация и управление движением» Санкт-Петербург, 2008; II, III научно-практических конференциях «Перспективные системы и задачи управления». Таганрог, 2007, 2008.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 13 научных работах, в том числе в 8 статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ, общим объемом 4.25 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Работа изложена на 184 страницах, содержит 95 рисунков и 4 таблицы. Библиографический список содержит 81 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и задачи, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе представлены основные направления мониторинга наземной инфраструктуры современного аэродрома. Выделена задача мониторинга продольных уклонов аэродромных покрытий, величины которых регулируются руководящими документами ИКАО на уровне 1.25% - 2.0%. Указаны недостатки применяемых в настоящее время средств мониторинга, предложено устраниить их за счет создания мобильного монитора с использованием в качестве носителя аппаратуры мониторинга наземного, мобильного, автономного одноосного колесного модуля со стабилизированной вблизи плоскости горизонта приборной платформой. Разработаны принципы построения комплексной системы навигации (КСН) управляемого неголономного ОКМ (отсутствует продольное и поперечное проскальзывание колес относительно подстилающей поверхности), основанные на широком использовании его специфичных динамической и кинематической моделей (Рис. 1). Они заключаются в том, что формирование в процессе навигации

заданной пространственно-временной траектории (ПВТ) и организация движения ОКМ по ней осуществляются двухконтурной системой управления (траекторной и локомоционной), а определение навигационных параметров, параметров ориентации ОКМ, а также картографирование наземной аэродромной инфраструктуры производятся КСН с микромеханической БИНС и цифровой видеокамерой. В КСН используется также информация от динамической модели (ДМ) ОКМ, а в микромеханической курсовертикали (ММКВ) системы управления с целью компенсации инерционных возмущений привлекается информация об отсутствии проскальзывания колес. Стабилизация платформы вблизи плоскости горизонта осуществляется за счет сил инерции, приложенных в центре масс платформы и возникающих при специально организуемом ускоренном перемещении ОКМ по подстилающей поверхности. Основные требования к комплексной системе навигации ОКМ: точность определения координат ОКМ - 3 м., скорости перемещения - $0.3 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$, углов ориентации платформы - 0.3° ; точность построения структурной карты наземной аэродромной инфраструктуры - 3 м.

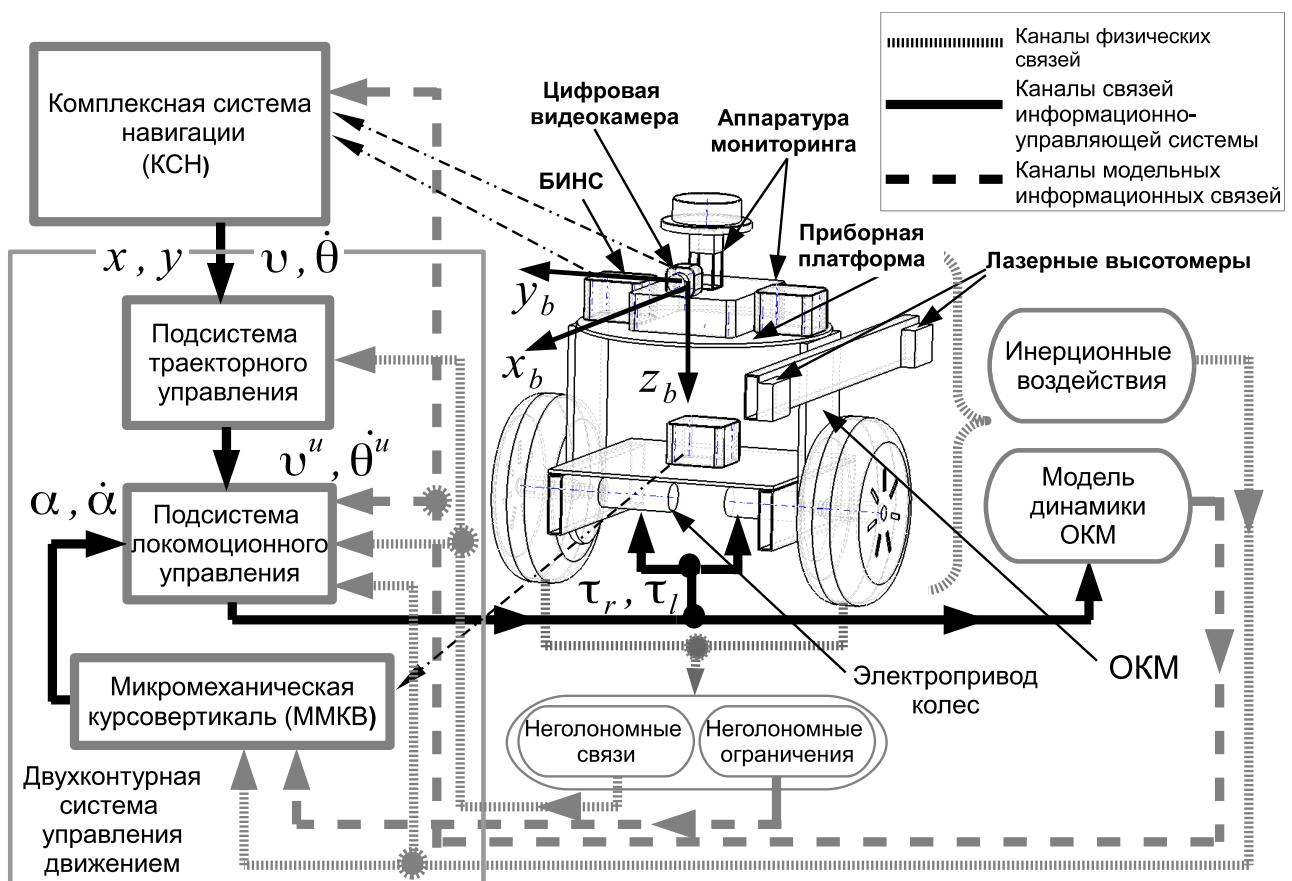


Рис. 1.
Функциональная схема ОКМ

Вторая глава посвящена получению аффинной модели динамики движения неголономного ОКМ, а также синтезу двухконтурной системы управления движением по ПВТ ОКМ со стабилизированной платформой.

На Рис. 2 приведена механическая схема ОКМ: α - угол отклонения плоскости $Cx_b y_b$ платформы от плоскости горизонта $O X_c Y_c$; $\dot{\phi}_r$ и $\dot{\phi}_l$ - угловые скорости вращения правого и левого колес; R - радиус колеса; d - расстояние от центра O оси колес до центра масс платформы C ; b - половина длины оси колес; θ - угол курса ОКМ; v - скорость перемещения ОКМ в плоскости горизонта. Условия неголономности ОКМ:

$$F(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = 0; \quad F(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & b & 0 & -R & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -b & 0 & 0 & -R \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta \ \alpha \ \phi_r \ \phi_l]^T$ -вектор обобщенных координат модели ОКМ (x, y - координаты центра O в инерциальной стартовой системе координат (СК) $OXYZ$). В результате использования особенностей кинематической модели ОКМ получены нелинейные матричные уравнения динамики вектора скоростей $\nu = [\dot{\alpha} \ v \ \dot{\theta}]^T$, линейные относительно вектора $\tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$ управляемых моментов на правом τ_r и левом τ_l колесах ОКМ:

$$(S(\mathbf{q})^T M(\mathbf{q}) S(\mathbf{q})) \dot{\nu} + S(\mathbf{q})^T (M(\mathbf{q}) \dot{S}(\mathbf{q}) \nu + B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) = S(\mathbf{q})^T E(\mathbf{q}) \tau, \quad (2)$$

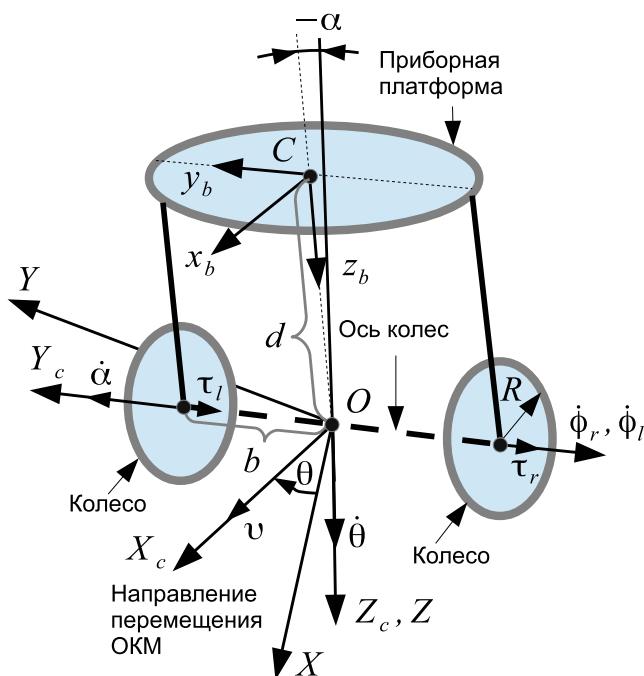


Рис. 2.

Механическая схема ОКМ

управления $\nu_m^u = [v^u \ \dot{\theta}^u]^T$, отличающегося эффективностью и при низко-

где $E(\mathbf{q})$ - матрица входных воздействий; $M(\mathbf{q})$ - матрица инерционных компонент; $B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ - вектор кориолисовых, центростремительных и гравитационных компонент; $S^T(\mathbf{q}) F^T(\mathbf{q}) = 0$. Компоненты \mathbf{q} в (2) определяются на основе ν и условий неголономности.

С целью обеспечения устойчивого движения ОКМ в процессе навигации по ПВТ синтезирована нелинейная подсистема траекторного управления, учитывающая условия неголономности (1) и формирующая требуемые значения скоростей v и $\dot{\theta}$ движений ОКМ. Решена задача стабилизации в окрестности нуля вектора e ошибок траекторного управления с тангенциальной (e_1) и нормальной (e_2) компонентами, ошибкой (e_3) по углу курса. Компоненты вектора

скоростных маневрах: $v^u = v \cos e_3 + K_1 e_1$; $\dot{\theta}^u = \dot{\theta} + v K_2 e_2 + K_3 \sin e_3$, где K_1 , K_2 , K_3 - положительные коэффициенты. Для анализа устойчивости предложена функция Ляпунова: $V = K_2/2 (e_1^2 + e_2^2) + (1 - \cos e_3)$; ее производная $\dot{V} = -K_3 \sin^2 e_3 - e_1^2 K_1 K_2$ - определенно отрицательная, что свидетельствует об асимптотической устойчивости подсистемы траекторного управления.

С целью стабилизации приборной платформы вблизи плоскости горизонта, а также выдерживания программных значений скоростей v^u и $\dot{\theta}^u$, поступающих от траекторной подсистемы, синтезирована нелинейная подсистема локомоционного управления, формирующая управляющие моменты τ_r , τ_l на колесах ОКМ и использующая естественную верхнюю маятниковость приборной платформы в соответствии с выявленной аналитической зависимостью ускорения ОКМ от угла наклона α . В рамках процедуры линеаризации модели (2) обратной связью получена нелинейная модель динамики движения ОКМ, линейная по угловым скоростям $\dot{\alpha}$ и $\dot{\theta}$:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \dot{v} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 - f_1 g_2 / g_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & g_2 / g_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где f_1 , f_2 , g_1 , g_2 - гладкие функции вектора q ; ω_1 , ω_2 - линеаризующие управление. Это позволило использовать для формирования ω_1 и ω_2 в контурах управления углами курса θ и отклонения платформы от плоскости горизонта α линейные регуляторы, коэффициенты которых определены путем численной оптимизации с применением нелинейной модели (2) ОКМ.

Моделирование ошибок, возникающих при управлении ОКМ двухконтурной системой (Рис. 1) в условиях реальной эксплуатации, проведено с использованием метода Монте-Карло. Отклонения параметров физической модели ОКМ от номинальных назначались случайным образом в диапазоне $\pm 30\%$. Времена запаздывания в каналах измерителей составляли величину порядка 0.02 с, характерную для применяемых в ОКМ микромеханических инерциальных датчиков. Установлено, что имеет место устойчивость движения и некритичное изменение качества регулирования ОКМ; ошибки следования ОКМ по ПВТ не превышают в переходных режимах 0.5 м., уменьшаясь до 0.01 м. по их завершении, что полностью соответствует требованиям по обеспечению мобильности ОКМ.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов функционирования комплексной системы навигации и картографирования для ОКМ, перемещающегося по поверхности аэродрома, а также распределенной позиционной системы навигации для группы ОКМ. Основой КСН ОКМ является микромеханическая БИНС, которая в автономном режиме не обеспечивает формирование устойчивого навигационного решения на длительных интервалах времени, что приводит к необходимости использования внешних корректоров, тем самым снижая уровень автономности ОКМ.

В работе повышение уровня автономности ОКМ реализовано путем построения специализированной архитектуры КСН, в которой процессы формирования оценок навигационных параметров объединены с процессом построения трехмерной структурной карты, определяемой координатами (в навигационной СК) реперов - характерных, однозначно идентифицируемых участков изображений, получаемых цифровой видеокамерой, и естественным образом располагающихся на элементах аэродромной инфраструктуры (Рис. 3). При этом ни сами реперы, ни их координаты априорно не известны и подлежат определению в процессе перемещения ОКМ по замкнутым ПВТ на поверхности аэродрома. Дополнительно, с целью повышения уровня

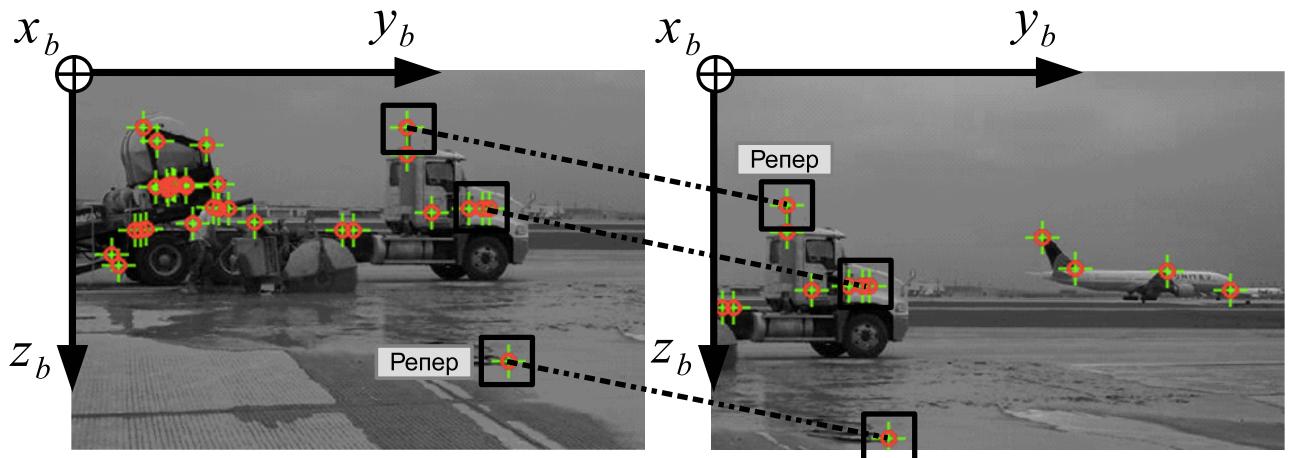


Рис. 3.

Перемещение реперов по кадру при движении ОКМ

автономности, в КСН предложено использовать информацию о параметрах движения ОКМ (псевдоизмерениях), рассчитываемых численным интегрированием уравнений динамики носителя на его борту при перемещении по ПВТ. Для динамической модели ОКМ, охваченной контуром подсистемы локомоционного управления, входными воздействиями служат опорные значения скоростей v^u и $\dot{\theta}^u$, поступающие от подсистемы траекторного управления. При построении КСН проведена модификация алгоритма EKF-SLAM (англ. SLAM - Simultaneous Localisation and Mapping - единовременная навигация и картографирование), в котором дискретный расширенный фильтр Калмана (англ. EKF - Extended Kalman Filter) оценивает вектор ошибок КСН вида:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{x}_{INS}^T \quad \delta \mathbf{x}_{DM}^T \quad \delta \mathbf{x}_{f,1}^T \quad \dots \quad \delta \mathbf{x}_{f,i}^T \quad \dots \quad \delta \mathbf{x}_{f,n}^T]^T, \quad (4)$$

где $\delta \mathbf{x}_{INS}$ - вектор ошибок БИНС; $\delta \mathbf{x}_{DM}$ - вектор ошибок ДМ; $\delta \mathbf{x}_{f,i}$ - вектор ошибок координатных параметров i -го репера; n - количество реперов на карте. Специфика алгоритма SLAM - размерность вектора $\delta \mathbf{x}$ изменяется в процессе работы фильтра за счет добавления новых и устранения дефектных реперов при перемещении ОКМ по ПВТ ($n = var$).

$$\text{Вектор ошибок БИНС в (4): } \delta \boldsymbol{x}_{INS} = \begin{bmatrix} \delta \dot{\boldsymbol{r}}^n & \delta \dot{\boldsymbol{v}}^b & \delta \dot{\boldsymbol{\Psi}}^n & \delta \dot{\boldsymbol{\omega}}^b & \delta \dot{\boldsymbol{f}}^b \end{bmatrix}^T,$$

где $\delta \boldsymbol{r}^n$, $\delta \boldsymbol{v}^b$, $\delta \dot{\boldsymbol{\Psi}}^n$, $\delta \dot{\boldsymbol{\omega}}^b$, $\delta \dot{\boldsymbol{f}}^b$ - векторы ошибок определения соответственно координат, скоростей, ориентации, угловой скорости и ускорений платформы ОКМ (верхний индекс b - связанная СК, n - навигационная СК).

Псевдоизмерения от ДМ ОКМ в КСН - модельные значения вектора \boldsymbol{v}_m^b линейной скорости центра масс C платформы и вектора $\boldsymbol{\omega}_m^b$ ее угловой скорости, записанные через координаты $\dot{\alpha}$, v , $\dot{\theta}$ модели (2) с учетом неголономной связи (1) колес ОКМ с подстилающей поверхностью: $\boldsymbol{v}_m^b = [v \cos \alpha - \dot{\alpha}d, -\dot{\theta}d \sin \alpha, v \sin \alpha]^T$, $\boldsymbol{\omega}_m^b = [-\dot{\theta} \sin \alpha, \dot{\alpha}, \dot{\theta} \cos \alpha]^T$. Вектор ошибок ДМ ОКМ в (4): $\delta \boldsymbol{x}_{DM} = [\delta \dot{\alpha} \ \delta v \ \delta \dot{\theta}]^T$. Уравнения ошибок ДМ ОКМ получены на основе линеаризации модели (2): $\delta \dot{\boldsymbol{x}}_{DM} = A_{DM} \delta \boldsymbol{x}_{DM} + G_{DM} \delta \boldsymbol{\tau}$, где $\delta \boldsymbol{\tau} = [\delta \tau_r \ \delta \tau_l]^T$ - вектор ошибок $\delta \tau_r$, $\delta \tau_l$ задания моментов на колесах ОКМ A_{DM} - матрица динамики модели ошибок ОКМ ($A_{DM} = \partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{DM}, \boldsymbol{\tau}) / \partial \boldsymbol{x}_{DM}$); G_{DM} - матрица управлений модели динамики ошибок ОКМ ($G_{DM} = \partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{DM}, \boldsymbol{\tau}) / \partial \boldsymbol{\tau}$).

Вектор координатных параметров i -го репера: $\boldsymbol{x}_{f,i} = [\boldsymbol{r}_{0,i}^n \ T \ \boldsymbol{q}_i \ \rho_i]^T$, где $\boldsymbol{r}_{0,i}^n = [x_{0,i}^n \ y_{0,i}^n \ z_{0,i}^n]^T$ - вектор координат начальной точки визирования репера; \boldsymbol{q}_i - кватернион ориентации начальной линии визирования репера; ρ_i - величина, обратная дальности от начальной точки визирования до репера вдоль линии визирования. Вектор ошибок координатных параметров i -го репера в (4): $\delta \boldsymbol{x}_{f,i} = [\delta \boldsymbol{r}_{0,i}^n \ \delta \boldsymbol{\Psi}_{f,i} \ \delta \rho_i]^T$, где $\delta \boldsymbol{r}_{0,i}^n$, $\delta \boldsymbol{\Psi}_{f,i}$, $\delta \rho_i$ - ошибки соответствующих элементов вектора $\boldsymbol{x}_{f,i}$.

Матрица системы для фильтра в модифицированном EKF-SLAM имеет блочную структуру с элементами, описывающими динамику ошибок БИНС и динамику ошибок ДМ ОКМ. Ввиду принятой неподвижности реперов динамика компонент вектора $\delta \boldsymbol{x}_{f,i}$ моделируется как динамика псевдоконстант: $\delta \dot{\boldsymbol{x}}_{f,i} = \mathbf{0}$. Матрицы измерений фильтра для векторов измерений \boldsymbol{z}_{DM} (измерения от ДМ) и \boldsymbol{z}_{CAM} (измерения от видеокамеры) сформированы путем формального варьирования соответствующих нелинейных уравнений измерений.

Функциональная схема КСН ОКМ представлена на Рис. 4. Входная информация КСН: измерения инерциальных датчиков $\boldsymbol{\omega}^b$ и \boldsymbol{f}^b (угловые скорости и ускорения); измерения проекций μ_i, λ_i реперов на светочувствительную матрицу видеокамеры; управляющие воздействия на ДМ ОКМ $v^u, \dot{\theta}^u$. БИНС определяет с учетом оценок $\delta \hat{\boldsymbol{\omega}}^b$, $\delta \hat{\boldsymbol{f}}^b$, $\delta \hat{\boldsymbol{r}}^n$, $\delta \hat{\boldsymbol{v}}^b$, $\delta \hat{\boldsymbol{\Psi}}^n$ навигационные параметры ОКМ: $\hat{\boldsymbol{r}}^n$, $\hat{\boldsymbol{v}}^b$, \hat{C}_b^n - соответственно оценки координат платформы ОКМ, ее скорости, матрицы направляющих косинусов, определяющей ориентацию платформы ОКМ. Оценки ошибок БИНС ($\delta \hat{\boldsymbol{r}}^n$, $\delta \hat{\boldsymbol{v}}^b$, $\delta \hat{\boldsymbol{\Psi}}^n$), ошибок инерциальных датчиков ($\delta \hat{\boldsymbol{\omega}}^b$, $\delta \hat{\boldsymbol{f}}^b$), ошибок определения координатных

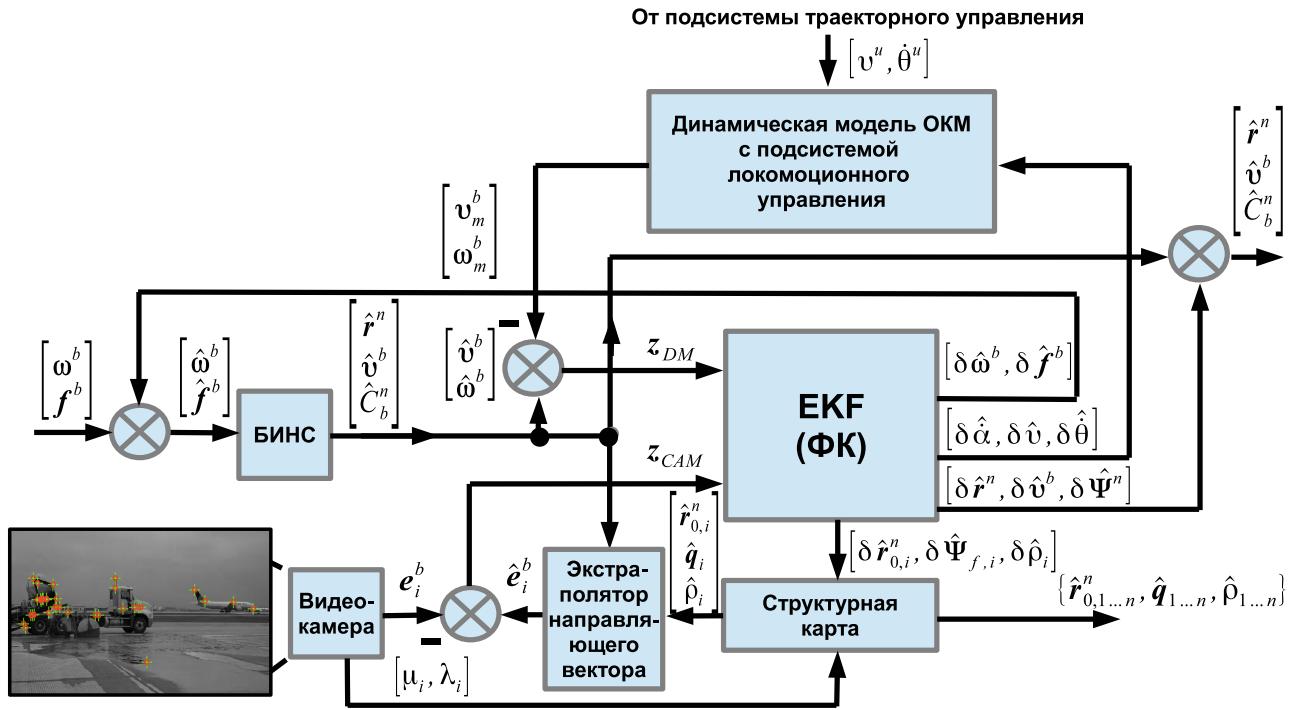


Рис. 4.

Функциональная схема КСН ОКМ

параметров реперов ($\delta\hat{r}_{0,i}^n, \delta\hat{\Psi}_{f,i}, \delta\hat{\rho}_i$), а также ошибок ДМ ($\delta\hat{\alpha}, \delta\hat{v}, \delta\hat{\theta}$) вычисляются ЕКФ.

Ошибки инерциальных датчиков при моделировании КСН: вектор сдвигов нулей гироскопов $\delta\omega_x = [20^{-3}, -10^{-3}, 10^{-3}] \text{ rad/s}$; СКО дискретных белых шумов гироскопов $n_\omega = 10^{-4} \text{ rad/s}$; вектор сдвигов нулей акселерометров $\delta f_x = [20^{-3}, -10^{-3}, 10^{-3}] \text{ m/s}^2$; СКО дискретных белых шумов акселерометров $n_f = 10^{-4} \text{ m/s}^2$. Параметры цифровой видеокамеры: разрешение - 320×240 пикселей; угол обзора - 90° ; СКО дискретного белого шума камеры - 0.1 пикселя. На Рис. 5 приведены графики ошибок определения координат Δr^n и скоростей Δv^b ; нижние индексы CAM - алгоритм КСН только с каналом БИНС - видеокамера (с использованием только z_{CAM}); нижние индексы DM - дополнительно с каналом БИНС - ДМ (дополнительно с z_{DM}). В результате моделирования установлено, что точности определения КСН навигационных параметров: координат ОКМ по завершении процессов оценивания координат реперов - 0.2 м.; скорости перемещения ОКМ - $0.1 \text{ m}\cdot\text{c}^{-1}$; углов ориентации - 0.1° ; координат реперов - 0.2 м. Показано также, что использование в КСН информации от ДМ обеспечивает значительное снижение темпов нарастания ошибок определения навигационных параметров ОКМ даже в случае умеренного нарушения адекватности ДМ. Вместе с тем установлено, что длительное автономное функционирование КСН приводит к несостоятельности ее оценок, а их состоятельность может быть обеспечена путем периодической коррекции КСН

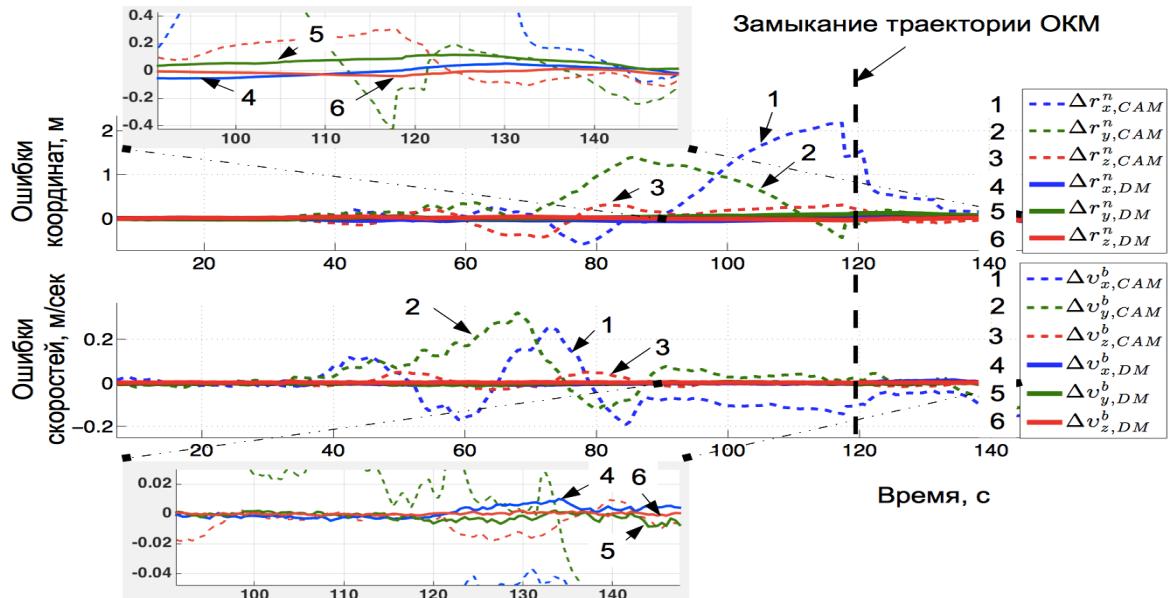


Рис. 5.

Ошибки определения координат и скоростей КСН ОКМ

например от спутниковой навигационной системы (СНС). Интервал времени автономной работы КСН между коррекциями при эксплуатации ОКМ в аэродромной инфраструктуре составляет по крайней мере сотни секунд и в значительной мере зависит от геометрии структурной карты реперов.

Ряд задач аэродромного мониторинга целесообразно выполнять группой ОКМ. При этом обмен навигационной информацией в рамках такой группы позволяет формировать более точную оценку навигационных параметров отдельных ОКМ, повышая автономность функционирования группы в целом. Для реализации такого обмена в диссертации предложена локальная позиционная система навигации (ПСН), используемая в качестве внешнего корректора для КСН. Основа ПСН - приемопередатчики, установленные на каждом ОКМ и выполняющие измерения расстояний между соседними ОКМ, а также осуществляющие обмен навигационной информацией между ними (Рис. 6). Конфигурация ПСН: r опорных ОКМ из группы n оснащены приемниками СНС и микромеханическими БИНС тактического класса; остальные $n - r$ ОКМ оснащены лишь микромеханическими БИНС коммерческого класса. Задача ПСН группы ОКМ - формирование оценок навигационных параметров всех модулей группы на уровне оценок для опорных модулей. В работе выбрана распределенная схема построения ПСН (РПСН), в которой оценки навигационных параметров каждого из ОКМ группы формируются фильтром на его борту, что обеспечивает устойчивость РПСН к отказам отдельных ОКМ, а также ее улучшенную масштабируемость при изменении количества n ОКМ в группе.

Вектор навигационных параметров i -го ОКМ в РПСН: $\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i \ \theta_i]^T$, где x_i, y_i - координаты в СК $OXYZ$; θ_i - угол курса i -го ОКМ. Вектор измерений \mathbf{z}_i , на борту ОКМ включает, в общем случае, независи-

мые от векторов состояния других ОКМ измерения \mathbf{q}_i (например координаты от СНС $\mathbf{q}_i = [x_{SNS} \ y_{SNS}]^T$ в опорных ОКМ), а также зависимые измерения - измерения расстояний $r_{i,j}$ между i -м и j -м ОКМ: $\mathbf{z}_i = [\mathbf{q}_i^T \ r_{i,j}^T]^T$. Уравнение динамики вектора \mathbf{x}_i определяется кинематической моделью неголономного ОКМ, построенной на базе (1), с вектором управлений $\mathbf{u}_i = [v_i \ \dot{\theta}_i]^T$.

Показано, что возникновение в процессе оценивания навигационных параметров ОКМ в РПСН негауссовских, в частности мульти-модальных, апостериорных плотностей вероятности (АПВ) этих параметров вызывает необходимость применения аппарата нелинейной фильтрации. В этой связи в РПСН предложено использовать Байесовский фильтр «частиц» (БФЧ), в

котором АПВ $p(\mathbf{x}_{i,k} | \mathbf{z}_{i,1..k}, \mathbf{u}_{i,1..k})$ представлена дискретным множеством «частиц» (англ. - particles): $p(\mathbf{x}_{i,k} | \mathbf{z}_{i,1..k}, \mathbf{u}_{i,1..k}) = \sum_{l=1}^N \gamma_{i,k}^l \delta(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{i,k}^l)$, $\sum_{l=1}^N \gamma_{i,k}^l = 1$, где N - количество «частиц»; $\gamma_{i,k}^l$ - весовой коэффициент l -ой «частицы»; $\delta(\)$ - дельта-функция; $\mathbf{x}_{i,k}^l$ - вектор состояния l -ой «частицы» i -го ОКМ на k -м шаге; $\mathbf{z}_{i,1..k}$ и $\mathbf{u}_{i,1..k}$ - соответственно векторы измерений и управлений ОКМ для моментов времени от 1 до k .

В результате анализа процессов распространения информации в РПСН установлено, что неучет факта коррелированности оценок навигационных параметров ОКМ группы, формируемых БФЧ, приводит к несостоительности этих оценок. Для обеспечения их состоятельности предложено применять в БФЧ алгоритм пересечения ковариаций (англ. - Covariance Intersection), предназначенный для работы с гауссовскими случайными величинами. С этой целью дискретное описание АПВ преобразовано в эквивалентное полигауссовское представление (ПП): $p(\mathbf{x}_{i,k} | \mathbf{z}_{i,1..k}, \mathbf{u}_{i,1..k}) = \sum_{l=1}^M \gamma_l G(\mathbf{x}_{i,k}, \boldsymbol{\eta}_l, P_l)$; $\sum_{l=1}^M \gamma_l = 1$; $G(\mathbf{x}_{i,k}, \boldsymbol{\eta}_l, P_l) = |2\pi P_l|^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x}_{i,k} - \boldsymbol{\eta}_l)^T P_l^{-1} (\mathbf{x}_{i,k} - \boldsymbol{\eta}_l)\right)$, где $G(\mathbf{x}_{i,k}, \boldsymbol{\eta}_l, P_l)$ - l -й компонент ПП; $\boldsymbol{\eta}_l$ - вектор математического ожидания l -го компонента ПП; P_l

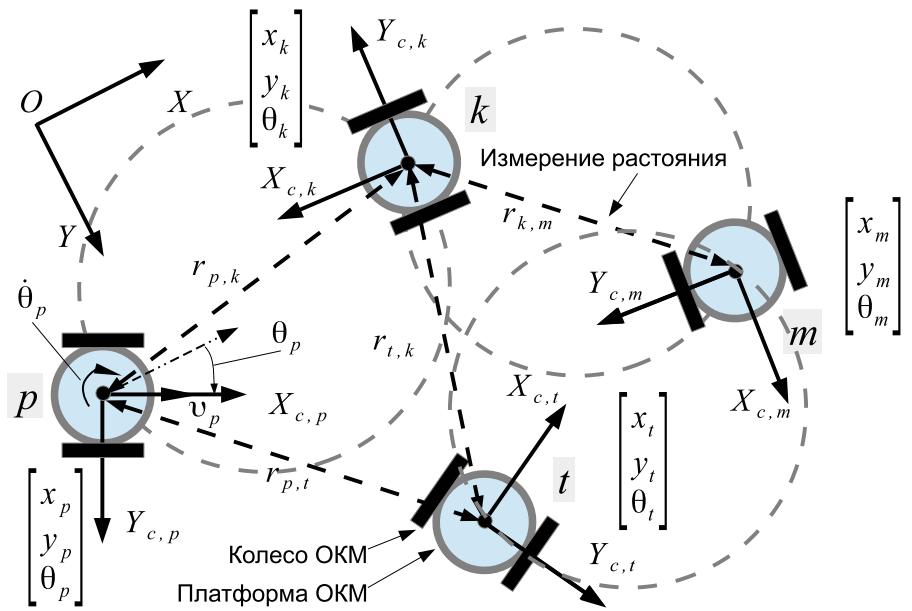


Рис. 6.

Конфигурация РПСН

- ковариационная матрица компонента ПП; M - количество компонент ПП. Рекуррентный алгоритм РПСН реализует двухэтапную процедуру формирования оценки АПВ $p(\mathbf{x}_{i,k}|\mathbf{z}_{i,1\dots k}, \mathbf{u}_{i,1\dots k})$ векторов навигационных параметров ОКМ. Первый этап, выполняемый автономно каждым из БФЧ отдельных ОКМ группы, заключается в формировании, с учетом текущего вектора управлений ОКМ $\mathbf{u}_{i,k}$, оценки прогнозирующей плотности вероятности $p(\mathbf{x}_{i,k}|\mathbf{z}_{i,1\dots k-1}, \mathbf{u}_{i,1\dots k})$. На втором этапе измерение взаимного расстояния $r_{i,j}$ между i -м и j -м ОКМ сопровождается обменом информацией между ними, в частности, i -ый ОКМ передает на борт j -го ОКМ полигауссовское представление прогнозирующей плотности $p(\mathbf{x}_{j,k}|\mathbf{z}_{j,1\dots k-1}, \mathbf{u}_{j,1\dots k})$. На борту j -го ОКМ, с учетом этой информации и измерения $r_{i,j}$, на базе алгоритма пересечения ковариаций определяется обновленное значение полигауссовского представления АПВ $p(\mathbf{x}_{j,k}|\mathbf{z}_{j,1\dots k}, \mathbf{u}_{j,1\dots k})$. «Частицы», соответствующие плотности $p(\mathbf{x}_{j,k}|\mathbf{z}_{j,1\dots k}, \mathbf{u}_{j,1\dots k})$, определены путем их выборки из обновленного полигауссовского представления этой плотности. Среднеквадратичная оценка $\hat{\mathbf{x}}_{i,k}$ вектора навигационных параметров i -го ОКМ определяется на основе этих «частиц» так: $\hat{\mathbf{x}}_{i,k} = \sum_{l=1}^N \gamma_{i,k}^l \mathbf{x}_{i,k}^l$. На Рис. 7 приведены полученные

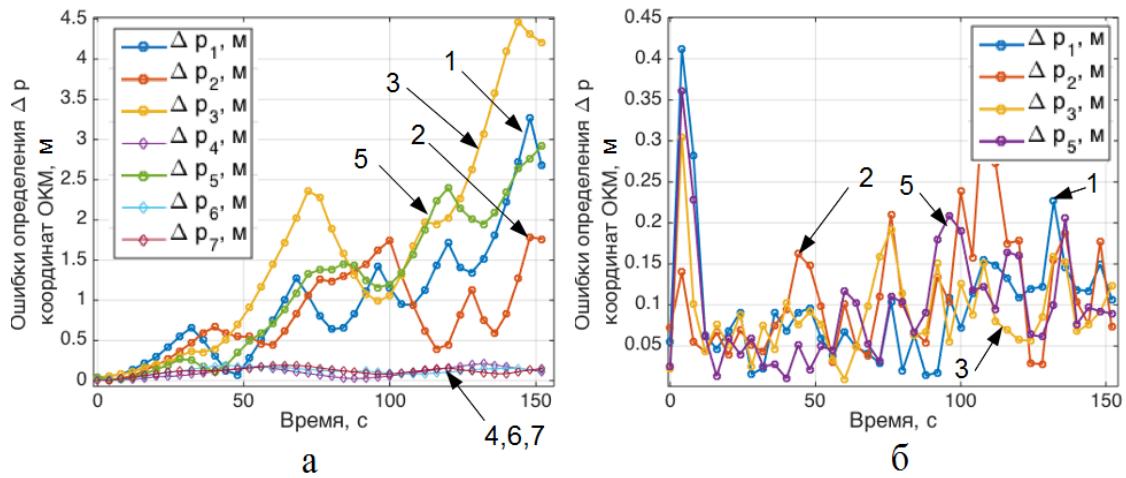


Рис. 7.

Ошибки определения координат ОКМ в РПСН

в результате численного моделирования графики ошибок Δp_i , $i = 1\dots 7$ оценок координат ОКМ группы с применением только микромеханических БИНС (Рис. 7,а) с применением дополнительно РПСН (Рис. 7,б). Видно, что ошибки оценок координат ОКМ 1,2,3,5, оснащенных только БИНС коммерческого класса, быстро нарастают. Применение же дополнительно РПСН позволило уменьшить их, приблизив к величинам ошибок опорных ОКМ 4,6,7, которые не превышают 0.4 м.

В четвертой главе приведено описание аппаратуры макета ОКМ (Рис. 8), разработанного для экспериментального подтверждения предлагаемых алгоритмов. Состав аппаратного обеспечения макета: подсистема локомоционного управления и ММКВ; подсистема БИНС-видеокамера;

подсистема центрального вычислителя; вспомогательные подсистемы связи, электропитания и хранения данных. Экспериментально установлено, что точность удержания подсистемой локомоционного управления скорости v перемещения (по завершении переходных процессов) - порядка $0.02 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; время переходных процессов не превышает 2 с. (Рис. 9). Точность удержания подсистемой локомоционного управления опорной скорости $\dot{\theta}$ курсового разворота - порядка $2^\circ/\text{s}$; время переходных процессов не превышает 1 с. Точность удержания приборной платформы ОКМ вблизи плоскости горизонта составляет величину порядка 0.5° .

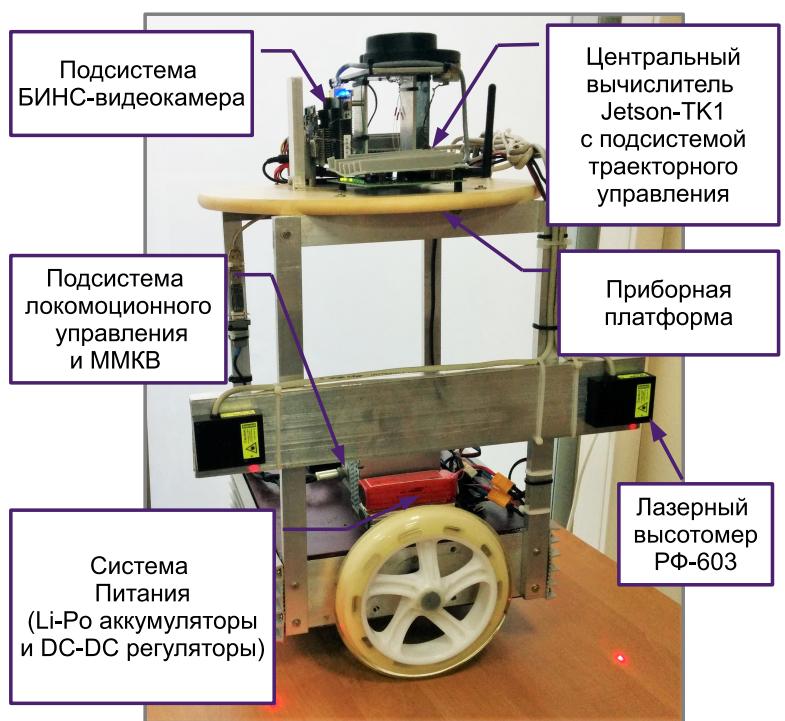


Рис. 8.
Макет ОКМ

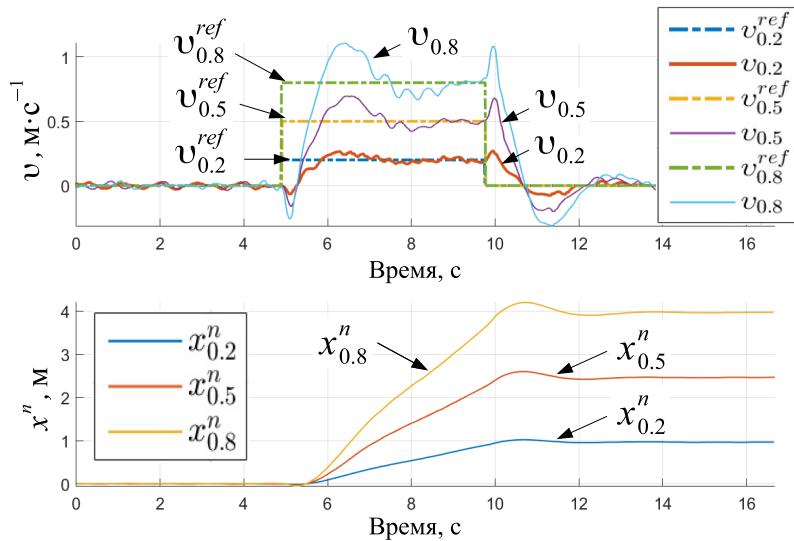


Рис. 9.
Скорость перемещения и координаты макета ОКМ

мерой в задачах ориентации ОКМ, позволив сформировать состоятельные оценки угла курса ОКМ, а также дрейфа нуля гироскопа курсового канала.

Для проведения экспериментальных исследований алгоритм КСН ОКМ был редуцирован до алгоритма оценки ориентации ОКМ путем комплексного использования информации от микромеханических ДУС и от цифровой видеокамеры. Результаты экспериментов подтвердили эффективность применения технологии SLAM с цифровой видеока-

С целью получения точной оценки углов ориентации платформы ОКМ с инерционным управлением разработано аппаратное, программное и алгоритмическое обеспечение ММКВ, не возмущаемой силами инерции. Для обеспечения невозмущаемости предложено использовать условия (1) неголономности связей между колесами ОКМ и подстилающей поверхностью, устанавливающие взаимно однозначное соответствие между угловыми ускорениями колес ОКМ и линейным ускорением его платформы. Результаты моделирования алгоритма ММКВ и экспериментальных исследований ее макетного образца показали, что коррекция инерционных возмущений в каналах акселерометров с использованием условий неголономности позволяет уменьшить ошибки определения ориентации платформы по углу α при интенсивном разгоне ОКМ от величин порядка 10° до величин порядка 0.2° .

Пригодность использования ОКМ для решения задач мониторинга аэродромной инфраструктуры подтверждена разработкой алгоритма и аппаратного обеспечения подсистемы измерения продольных уклонов аэродромных покрытий. Для построения алгоритма предложено использовать нелинейный сигма-пойнт фильтр Калмана (англ. SPKF - Sigma-Point Kalman Filter), осуществляющий комплексную обработку информации от акселерометров, ДУС и двух лазерных высотомеров. Достигнутая в рамках экспериментальных исследований разрешающая способность по углу продольного уклона аэродромного покрытия составляет величину порядка 2-х угловых минут (1σ) $< 0.07\%$, что соответствует требованиям ИКАО.

Основные результаты диссертации.

1. Предложены принципы построения комплексной системы навигации управляемого ОКМ, основанные на использовании его специфичных неголономных динамической и кинематической моделей.
2. Создана матричная аффинная модель неголономного ОКМ, упрощающая синтез нелинейной подсистемы локомоционного управления, а также ориентированная на комплексирование навигационной информации в ОКМ.
3. Синтезирована двухконтурная (траекторная и локомоционная) система управления движением ОКМ с одновременной стабилизацией приборной платформы вблизи плоскости горизонта, обеспечивающая в процессе навигации выход ОКМ из произвольной точки подстилающей поверхности на заданную ПВТ и движение по ней.
4. Разработан алгоритм комплексной системы навигации и картографирования для ОКМ на базе технологии SLAM с аппаратной реализацией на основе микромеханической БИНС, цифровой видеокамеры и динамической модели неголономного ОКМ. Разработанный алгоритм обеспечивает автономное решение навигационной задачи на продолжительных интервалах времени.
5. Предложен принцип построения и разработан алгоритм функционирования распределенной позиционной системы навигации группы ОКМ, в

- которой только опорные модули оснащены высокоточным навигационным оборудованием, но которая формирует оценки навигационных параметров всех моделей группы на уровне оценок для опорных модулей.
6. Разработан макет ОКМ и создан комплекс его аппаратного навигационного обеспечения, включающий ММКВ, не возмущаемую силами инерции, а также подсистему измерения продольных уклонов аэродромных покрытий. Экспериментальные исследования основных подсистем макета подтвердили возможность выполнения заданных точностных требований к комплексной системе навигации и стабилизации платформы ОКМ.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Максимов В. Н., Черноморский А. И. Комплексная система навигации и локального картографирования для одноосного колесного модуля // Гироскопия и Навигация. 2016. Т. 92, № 1. С. 116-132. (2,0 п.л./1,5 п.л.).
2. Максимов В. Н., Черноморский А. И. Система управления неголономным одноосным колесным модулем для мониторинга геометрических параметров аэродромных покрытий // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2015. № 3. С. 156-167. (1,365 п.л./1,0 п.л.).
3. Одноосные колесные модули с управляемой платформой / В.Н. Максимов [и др.] // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 260-269. (1,125 п.л./0,1 п.л.).
4. Черноморский А. И., Максимов В. Н., Плеханов В. Е. Математическая модель одноосного колесного модуля в матричной форме // Вестник МАИ. 2013. Т. 20, № 2. С. 182-188. (0,75 п.л./0,5 п.л.).
5. Измерительная комплексная навигационная система одноосного колесного модуля / В.Н. Максимов [и др.] // Вестник МАИ. 2012. Т. 19, № 4. С. 120-128. (1,0 п.л./0,5 п.л.).
6. Maximov V., Tabarovsky O., Filgus D. Distributed localisation algorithm for IoT network // IEEE Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Banff. Canada, 2015. P. 1-7.
7. Черноморский А. И., Максимов В. Н., Плеханов В. Е. Микромеханическая курсовертикаль одноосного колесного модуля // Вестник МАИ. 2011. Т. 18, № 3. С. 170-176. (0,75 п.л./0,5 п.л.).
8. Разработка блока инерциальных датчиков / В.Н. Максимов [и др.] // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 51-53. (0,25 п.л./0,05 п.л.).
9. Блок инерциальных датчиков / В.Н. Максимов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 50-54. (0,5 п.л./0,1 п.л.).
10. Ориентация, навигация и стабилизация одноосных колесных модулей / В.Н. Максимов [и др.] М.: Изд-во МАИ, 2012. 271 С.
11. Maximov V., Tabarovsky O. Survey of Accuracy Improvement Approaches for Tightly Coupled ToA/IMU Personal Indoor Navigation System // Proc. of Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Montbeliard. France, 2013. P. 7-10.