

На правах рукописи



Шукалов Анатолий Владимирович

**Информационно-измерительная бесплатформенная система ориентации
летательных аппаратов на инерциальных датчиках отечественного
производства с микросистемными чувствительными элементами**

Специальность 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие
системы (в промышленности)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тула - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: Распопов Владимир Яковлевич,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»,
заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: Солдаткин Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева» – КАИ,
заведующий кафедрой

Веремеенко Константин Константинович,
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»,
заместитель декана по НИР

Ведущая организация: ОАО «Московский институт электромеханики
и автоматики»

Защита состоится «___» _____ 2014 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.271.07 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, к.9, ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», (300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92)

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ф.А. Данилкин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Применение инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров), изготовленных с применением технологий микросистемной техники (МСТ), позволяет обеспечить выполнение требований к бесплатформенным системам ориентации (БСО) по массе, габаритам и времени готовности. В отечественной литературе инерциальные датчики, полностью изготовленные по технологиям МСТ (MEMS), называют микромеханическими гироскопами (ММГ) и акселерометрами (ММА).

Интегральные гироскопы и акселерометры по массе и габаритам превосходят ММГ и ММА, но сохраняют все преимущества, обусловленные микросистемным чувствительным элементом (ЧЭ), и располагают более широкими возможностями настройки динамических характеристик по сравнению с ММГ и ММА. Кроме того, для большинства применений инерциальных датчиков небольшое увеличение массы и габаритов не является критичным.

Одной из общегосударственных задач является импортозамещение. В информационно-измерительных системах авионики ЛА комплексированы датчики различных физических величин, в том числе и в системах ориентации БПЛА. Общепринятым математическим аппаратом комплексирования является фильтрация, на основе фильтров Калмана (ФК).

Неинвариантная схема комплексирования в БСО гироскопов и акселерометров на основе ФК имеет резерв повышения точности за счет введения блока предварительной обработки информации с гироскопов, устраняющего влияние линейных ускорений на накапливаемую погрешность, и блока отключения акселерометров по заданному критерию.

Актуальность диссертационной работы обусловлена проблемной задачей создания БСО на инерциальных датчиках с микросистемными ЧЭ отечественного производства по точности, времени готовности, массе и габаритам, обеспечивающей ее применение как в пилотируемых ЛА в качестве резервной, так и в БПЛА в качестве основной системы ориентации.

Цель работы

Целью работы является создание БСО, построенной по неинвариантной схеме комплексирования на базе ФК гироскопов и акселерометров отечественного производства с микросистемными чувствительными элементами, обладающей свойствами бесплатформенной инерциальной гировертикали (БИГВ), технические характеристики которой обеспечивают ее применение в качестве резервной – для пилотируемых ЛА, либо в качестве основной – для БПЛА, систем ориентации.

Основные задачи исследования

Поставленная цель достигается решением совокупности задач, из которых основными являются следующие:

1. Анализ современного состояния и основных тенденций развития инерциальных датчиков, производимых на базе МСТ (MEMS) –технологий и информационно-измерительных систем на их основе, отечественных и зарубежных компаний.

2. Анализ алгоритмов ориентации БСО и ее акселерометрической коррекции путем комплексирования инерциальных датчиков по инвариантной схеме на базе фильтров Калмана-Винера.

3. Исследование влияния погрешностей гироскопов (дисперсия погрешности прогноза), акселерометров (среднеквадратичное отклонение) и шага дискретизации вычислителя на постоянную времени БСО (БИГВ) и оценка потенциально достижимого значения постоянной времени БИГВ на отечественных инерциальных датчиках.

4. Разработка конструкции, изготовление и испытания РБСО с отечественными инерциальными датчиками на аттестованном стендовом оборудовании с имитацией полета реального ЛА (ФГУП «ГосНИИ АС», г. Москва).

5. Анализ результатов испытаний РБСО и развитие ее структуры с целью повышения точности определения угловых параметров ориентации ЛА, перемещающегося с ускорением и угловыми скоростями вращения.

6. Разработка математической модели гироскопа RR-типа, учитывающей влияние линейных ускорений и угловых скоростей движения ЛА на выходной сигнал.

7. Разработка алгоритма отключения акселерометрической коррекции РБСО и алгоритма предварительной обработки информации, устраняющего из сигнала гироскопа составляющую, обусловленную деформацией упругих элементов подвеса ротора.

Методы исследования. В работе применены методы теоретической механики, в том числе теории нелинейных колебаний, методы прикладной теории гироскопов, теории автоматического управления, аналитического и численного решения дифференциальных уравнений, методы теории фильтрации.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что на основании теоретических исследований, математического моделирования работы и стендовых испытаний реального образца РБСО сделаны научно обоснованные выводы о методах и способах реализации увеличения точности РБСО, построенной на отечественных инерциальных датчиках, комплексированных на базе фильтров Калмана-Винера.

Практическая ценность диссертации заключается в следующем:

- разработана конструкция и изготовлена РБСО на отечественных инерциальных датчиках, которая по точности, времени готовности, массе и

габаритам пригодна для применения в пилотируемых ЛА, а также в БПЛА – в качестве основной системы ориентации;

- для повышения точности работы РБСО предложено ввести в структуру РБСО блоки предварительной обработки информации с гироскопов и отключения акселерометров;

- предложена методика устранения влияния на показания РБСО неточности ее установки на стенде, которая применима для устранения влияния неточности установки РБСО в ЛА на ее показания.

Достоверность результатов работы определяется правильным использованием законов механики и электротехники, математических методов, положенных в основу исследований, а также успешной практической апробацией рекомендаций, полученных на основе теоретических разработок.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки ФГУП «Санкт-Петербургское Опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», а также в учебный процесс Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО) на кафедре машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры. Копии актов внедрения приведены в приложении.

Апробация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- 13,14 научных конференциях «Навигация и управление движением», ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 2011г., 2012 г.,

- XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (30 мая – 1 июня 2011 г.), ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 2011 г.;

- 5-ом международном форуме и выставке «Беспилотные многоцелевые комплексы» (1-3 марта 2011 г.), Москва, ЦВК «Экспоцентр», 2011 г., а также на других конференциях и семинарах разного уровня.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, 5 из них – в периодических изданиях из списка ВАК. Получен 1 патент на полезную модель.

Результаты диссертации использованы в 11 научно-технических отчетах о выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ОКБ «Электроавтоматика» (инв. 317705...17713, 2010-2012 г.; инв. №17847, №17848, 2010-2012 г.), Санкт-Петербург.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст диссертации (156 страниц) содержит 69 иллюстраций и 21 таблицу. Список литературы включает 94 библиографических источника.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постоянная времени БСО, в которой инерциальные датчики комплексированы по неинвариантной схеме на базе фильтра Калмана, определяет потенциальную точность измерения угловых параметров ЛА и зависит от дисперсий погрешностей прогноза гироскопов, среднеквадратичных отклонений акселерометров и шага дискретизации.
2. Математическая модель выходного сигнала гироскопа RR-типа, учитывающая составляющие, обусловленные деформацией упругих элементов подвеса ротора вследствие движения ЛА.
3. Структура БСО с меньшей зависимостью измерений углов параметров ориентации от линейных ускорений и угловых скоростей движения ЛА.
4. Алгоритмы работы блока предварительной обработки сигналов гироскопов для устранения составляющих, обусловленных деформацией упругих элементов подвеса ротора, и отключения блока акселерометров по критериям продольного ускорения, угловой скорости курса и тангажа ЛА.
5. Методика устранения влияния неточности установки РБСО на ее показания.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность, формулируются цели и задачи работы, определяются объекты исследования, констатируется научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе сформулирована задача ориентации летательного аппарата (ЛА). Приведен обзор современных инерциальных MEMS – датчиков и измерительных модулей на их основе.

Приведены данные, показывающие, что интегральные инерциальные датчики обладают большей точностью и стабильностью параметров по сравнению с ММГ и ММА. Переход на интегральные инерциальные датчики отечественного производства в настоящее время может решить проблему импортозамещения при создании БСО для БПЛА и резервной БСО (РБСО) для пилотируемых ЛА.

Выполнен анализ алгоритмов ориентации. Показано, что устранить тенденцию к накоплению погрешностей БСО и придать ей свойство избирательности по отношению к линии местной вертикали возможно с помощью комплексирования с акселерометрами. При этом БСО становится платформенной инерциальной гировертикалью (БИГВ).

Во второй главе рассмотрены теоретические основы построения БИГВ, в которой акселерометры обеспечивают устранение накапливаемой погрешности определения углов тангажа θ и крена γ , а гироскопы обеспечивают снижение влияния динамики движения ЛА на точность работы БИГВ. Это достигается применением в БИГВ специально организованного алгоритмически, связующего звена, в качестве которого применен фильтр Калмана.

Рассматривается базовая схема построения БИГВ (рис.1), позволяющая развязать параметры БИГВ от параметров ЛА, и проводится исследование ее параметров.

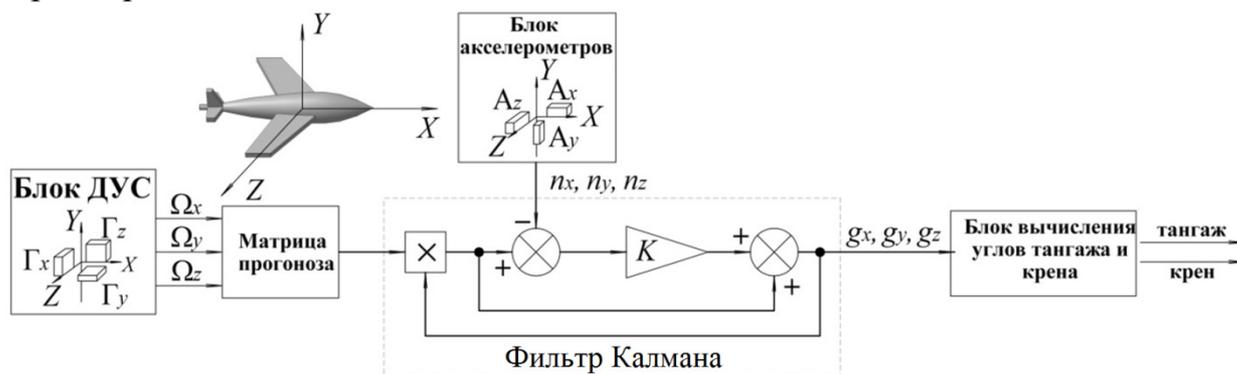


Рис. 1 – Структурная схема БИГВ

В схеме на рис. 1 информация о поведении полезного сигнала во времени формируется за счет применения ДУС при прогнозировании сигнала. Фильтр Калмана решает следующую задачу: подавляет в векторе кажущегося ускорения составляющую, обусловленную ускоренным движением летательного аппарата, сохраняя при этом вектор ускорения силы тяжести Земли \vec{g} . Таким образом, на выходе фильтра Калмана формируются проекции вектора $\vec{g}(g_x, g_y, g_z)$, по которым вычисляются углы тангажа и крена ЛА.

Основным параметром, определяющим качество работы БИГВ на борту ЛА, является постоянная времени T :

$$T = \tau / K,$$

где τ – шаг дискретизации БИГВ; $K = \frac{p_a + q_a}{p_a + q_a + r_a}$ – коэффициент передачи

фильтра Калмана; p_a – допустимая дисперсия погрешности оценивания ФК; q_a – дисперсия погрешности прогноза ФК; r_a – дисперсия погрешности измерения ФК.

Постоянная времени БИГВ аналогична постоянной времени платформенной вертикали. Таким образом, основным направлением исследования БИГВ является выявление теоретически возможных резервов увеличения постоянной времени.

В процессе анализа БИГВ:

1. Получены математические зависимости, позволяющие рассчитать допустимую погрешность оценивания, исходя из паспортных характеристик применяемых датчиков и требуемой точности определения углов тангажа и крена.

2. Предложена эмпирическая зависимость вычисления дисперсии погрешности прогноза, позволяющая отказаться от математического моделирования погрешностей прогноза фильтра Калмана:

$$q_a = C \cdot \sigma^2 \cdot \tau^2,$$

где $C \approx 10^{-2} \text{ г}^2 / \text{градус}^2$ постоянный коэффициент; σ – случайная погрешность ДУС.

3. Получена зависимость для вычисления постоянной времени T :

$$T = \frac{p_a + C \cdot \sigma^2 \cdot \tau^2}{C \cdot \sigma^2 \cdot \tau},$$

которая показывает, что увеличение постоянной времени достигается при снижении погрешности ДУС и шага дискретизации БИГВ (рис. 2)

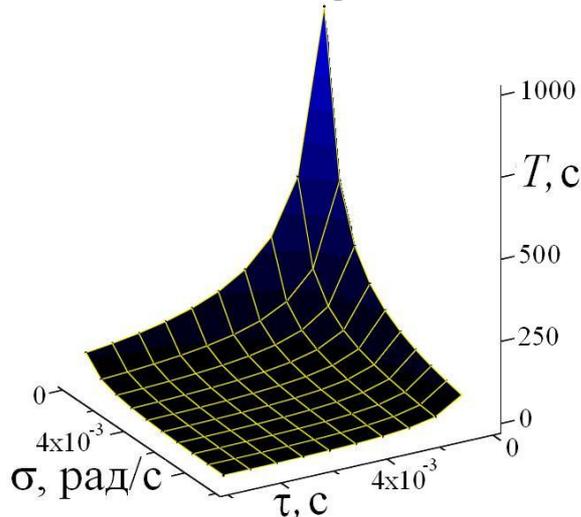


Рис. 2. Зависимость $T = f(\sigma, \tau)$ при $\Delta\alpha_{ш}=0,5$

Расчет параметров БИГВ для резервной бесплатформенной системы ориентации (РБСО), построенной на отечественных ДУС «ММГ-ЭПТРОН» (ОАО «Концерн «ЦНИИ «электроприбор») и акселерометрах АТ-1104 (ОАО «АНПП «ТЕМП-АВИА») позволяет обеспечить значение постоянной времени $T=38,46$ с при шаге дискретизации $\tau=0,01$ с, коэффициенте передачи $K=2,6 \times 10^{-4}$, и точности выработки угловых параметров 1 градус.

Полученный результат показывает высокую потенциальную точность определения углов ориентации.

В третьей главе приведено описание технической реализации РБСО (рис. 3) и результаты ее лабораторных испытаний.

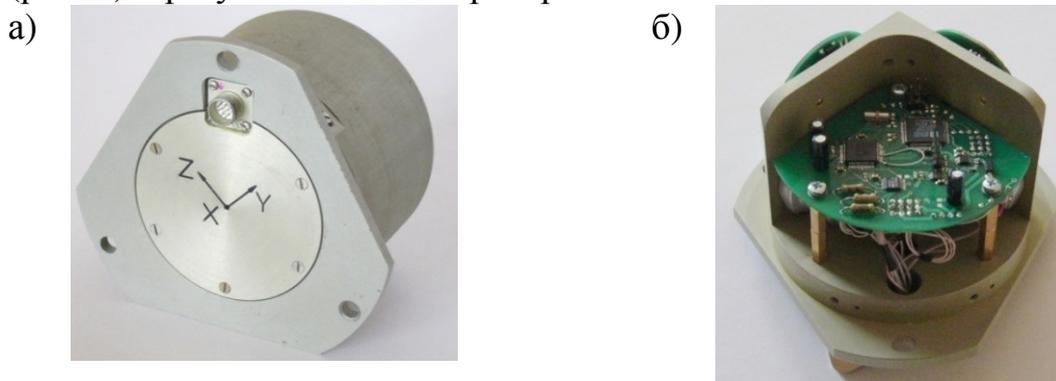


Рис. 3. – РБСО: а – общий вид; б – вид без крышки

РБСО содержит три микромеханических гироскопа ММГ-ЭПТРОН, три микромеханических гироскопа *ADXRS-642* и три компенсационных акселерометра *AT1104*, вычислительное устройство на базе микроконтроллера *ADUC 7026*, обеспечивающее выработку углов тангажа, крена, угловых скоростей, схемы согласования измерительных элементов с вычислительным устройством, последовательный цифровой интерфейс, по которому осуществляется вывод параметров ориентации.

Установлено, что ДУС ММГ-ЭПТРОН имеют меньшие случайные погрешности, чем *ADXRS642*, но имеют постоянное запаздывание порядка 250 мс. Шумовые составляющие акселерометров *AT-1104* имеют случайное блуждание скорости $(3\div 4)\times 10^{-3}$ м/с^{3/2}, смещение нулевых сигналов не более 0,01 g, а нестабильность нуля – порядка 10^{-3} м/с².

Испытания РБСО проводились на трехкомпонентном стенде СЗ-600, подключенном к комплексу КПМ-1000М, в ФГУП «ГосНИИАС».

В процессе подготовки испытаний на трехступенном стенде разработана методика устранения влияния неточности установки РБСО на ее показания.

В процессе испытаний случайная погрешность РБСО по угловым скоростям составила 2°/с, а по угловым параметрам до 1° в статике и до 3° при маневрировании ЛА.

В процессе испытаний установлено, что из-за наличия углов рассогласования осей связанных систем координат РБСО и стенда, помимо постоянной разницы показаний по углам тангажа и крена, возникает перекрестное взаимовлияние каналов из-за рассогласования осей при вращении стенда по углу тангажа или крена. Предложен способ снижения инструментальных погрешностей из-за рассогласования связанных осей РБСО и ЛА путем введения корректирующей матрицы, а также метод ее определения после установки РБСО в корпусе ЛА.

Испытания РБСО проводились в статическом и динамическом режимах в нормальных климатических условиях по ГОСТ РВ 20.39.301-97. Динамический режим заключался в имитационных полетах в течении 10 часов по 6-ти различным маршрутам при использовании аэродинамической модели самолета ТУ-160.

Результаты испытаний подтвердили устойчивую работу РБСО при длительных режимах эксплуатации (свыше 10 часов) и выявили резервы повышения точности РБСО.

Четвертая глава посвящена анализу выходных сигналов инерциальных датчиков с позиции их зависимости от ускорений и угловых скоростей ЛА, вызывающих деформацию упругих элементов подвеса ЧЭ.

Угловые и линейные координаты движения для ротора гироскопа RR-типа после оценки цифровых значений входящих в них величин описываются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} J_\alpha \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha &= (J_\beta - J_\gamma - J_\alpha) \omega_y \dot{\gamma} + (J_\beta - J_\gamma) \omega_y \omega_z - J_\alpha \dot{\omega}_x, \\ J_\beta \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + G_\beta \beta &= (J_\gamma + J_\beta - J_\alpha) \omega_x \dot{\gamma} + (J_\gamma - J_\alpha) \omega_z \omega_x - J_\beta \dot{\omega}_y, \\ J_\gamma \ddot{\gamma} + b_\gamma \dot{\gamma} + G_\gamma \gamma &= (J_\alpha - J_\gamma - J_\beta) (\omega_x \dot{\beta} + \omega_y \dot{\alpha}) + (J_\alpha - J_\beta) \omega_x \omega_y - J_\gamma \dot{\omega}_z, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + b_x \dot{x} + (G_x - m\dot{\gamma}^2)x - 2m\dot{y}\dot{\gamma} &= ma_x; \\ m\ddot{y} + b_y \dot{y} + (G_y - m\dot{\gamma}^2)y + 2m\dot{x}\dot{\gamma} &= ma_y; \\ m\ddot{z} + b_z \dot{z} + G_z z &= ma_z. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где γ, α, β – углы отклонения ротора; $J_\alpha, J_\beta, J_\gamma$ – главные моменты инерции ротора относительно соответствующих осей; $b_\alpha, b_\beta, b_\gamma, b_x, b_y, b_z$ – коэффициенты демпфирования; $G_\alpha, G_\beta, G_\gamma, G_x, G_y, G_z$ – коэффициенты жесткости; m – масса ротора; $a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – линейные ускорения и угловые скорости ЛА.

Для параметров исследуемого гироскопа можно учитывать только перемещение под действием ускорения перпендикулярного плоскости ротора $D_\alpha = ma_z / \sigma$. Показано, что амплитуда вторичных (информативных) колебаний ротора в установившемся режиме определяется выражением $\alpha = f_\alpha / \sigma_\alpha$ (f_α – правая часть первого уравнения системы (1)).

На рис. 4 показана схема, иллюстрирующая изменение воздушных зазоров в емкостном датчике перемещений ротора.

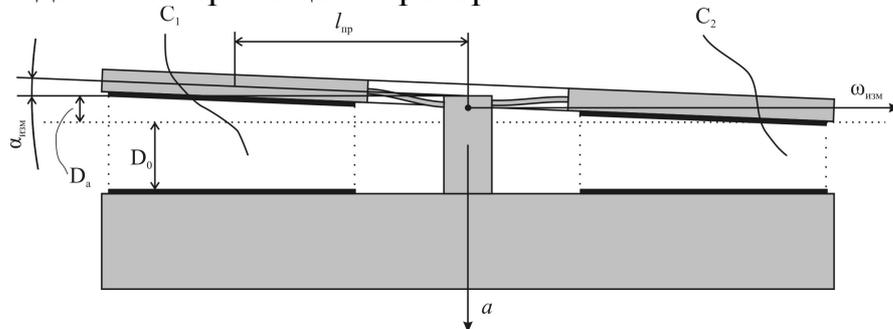


Рис. 4. Изменение зазоров емкостного датчика перемещений ротора (D_0 – зазор при отсутствии деформации упругих элементов; D_α – изменение воздушного зазора)

Выражения для величин измерительных емкостей имеют вид:

$$C_{1,2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{D_0 \pm l_y \sin \alpha_{изм} + D_\alpha}; \quad (3)$$

где $\varepsilon, \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость среды и диэлектрическая постоянная, соответственно (знаки \pm соответственно для емкостей C_1 и C_2).

С учетом (3) и выражения для величины D_α , выходной сигнал определяется зависимостью

$$U_{вых} = 2U_0 K_{II} \frac{-l_y \left(K_\alpha \omega_y + \frac{1}{G_\alpha} [(J_\beta - J_\gamma) \omega_y \omega_z - J_\alpha \dot{\omega}_x] \right)}{D_0 + \frac{ma_z}{G_z}}, \quad (4)$$

где K_{II} – коэффициент преобразования измерительной цепи.

Из анализа (4) следует, что целесообразным является повышение точности выходного сигнала гироскопа путем его коррекции на основе алгоритмической компенсации.

Анализ математической модели акселерометра АТ1104 показал отсутствие влияния угловой скорости на выходной сигнал.

В пятой главе рассмотрены блоки предварительной обработки сигналов датчиков и отключения акселерометрической коррекции. Приводятся результаты математического моделирования работы РБСО с учетом разработанных блоков на борту БПЛА.

Блок предварительной обработки сигналов датчиков (БПОСД) реализуется на основании математических моделей гироскопов, разработанных в четвертой главе и реализуется в соответствии со схемой на рис. 5.

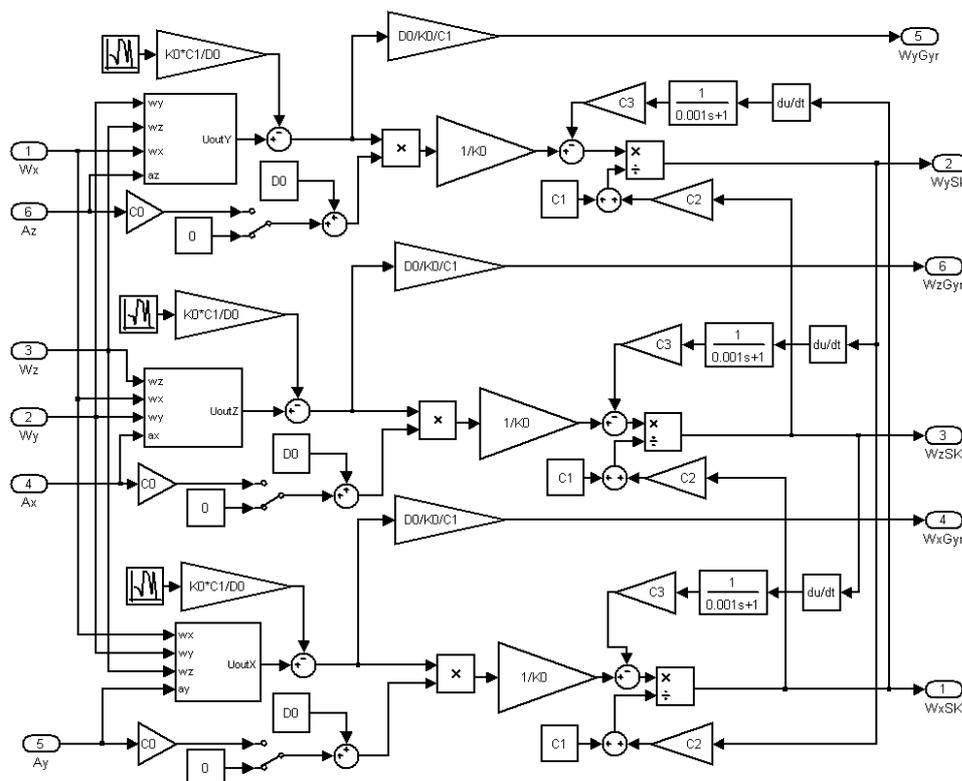


Рис. 5. – Структурная схема блока предварительной обработки сигналов датчиков

Алгоритм работы БПОСД следующий:

1. Выходные сигналы гироскопов делятся на коэффициенты передачи, рассчитанные по выражениям:

$$K_x = \frac{K_0}{D_0 + C_0 a_y}; K_y = \frac{K_0}{D_0 + C_0 a_z}; K_z = \frac{K_0}{D_0 + C_0 a_x},$$

где K_0, D_0, C_0 – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами микромеханической структуры гироскопа.

2. Из полученных значений вычитается производная угловой скорости, рассчитанная по значениям угловых скоростей на предыдущих тактах работы блока.

3. Полученные значения для каждой оси чувствительности делятся на величины D_x, D_y, D_z :

$$D_x = C_1 + C_2 \omega_y, D_y = C_1 + C_2 \omega_z, D_z = C_1 + C_2 \omega_x,$$

где C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами микромеханической структуры гироскопа; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости, рассчитанные на предыдущем шаге работы блока.

Полученные значения сигналов соответствуют угловым скоростям на выходе блока.

Результаты моделирования (рис.6) при воздействии линейных ускорений амплитудой 1 g и угловых скоростей синусоидальной формы амплитудой 50°/с показали эффективность работы блока и существенное снижение систематической погрешности гироскопа.

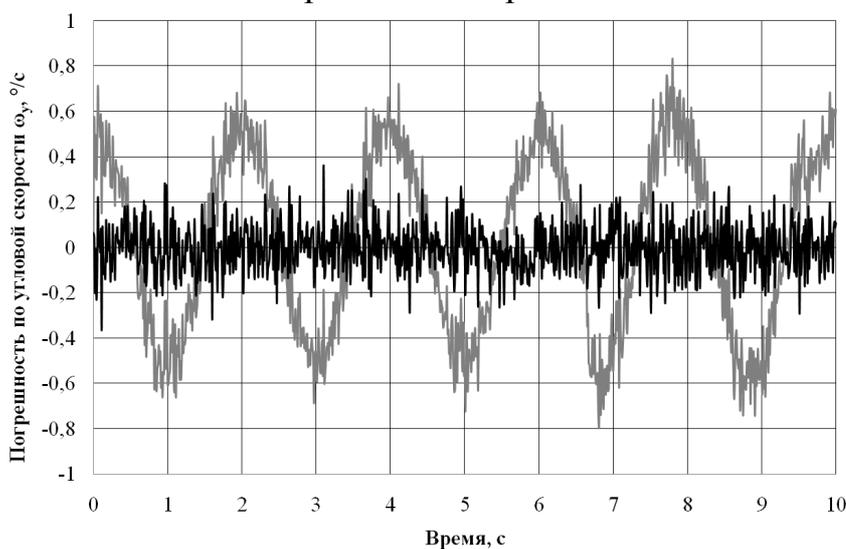


Рис. 6. – Результаты моделирования работы БПОСД (черный – скорректированный сигнал, серый – нескорректированный)

При разработке блока отключения коррекции были проанализированы различные варианты движения ЛА при различных режимах полета, а также критерии для идентификации этих режимов. Предложены структурная схема РБСО (рис. 7) и блок отключения коррекции (рис.8).

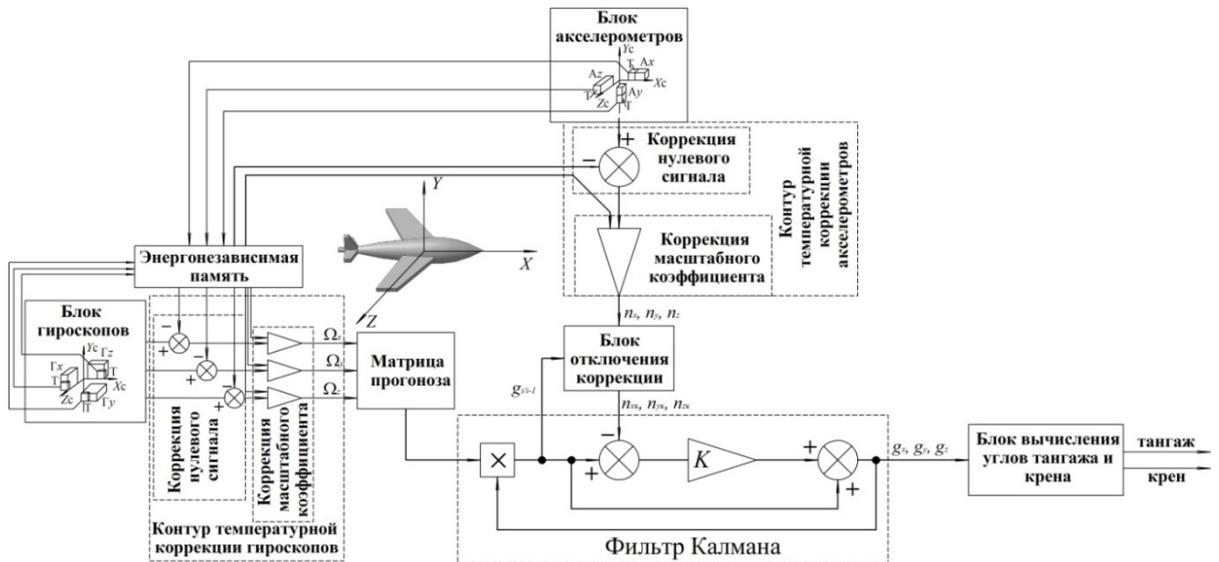


Рис. 7. – Структурная схема РБСО с БПОСД и с блоком отключения коррекции

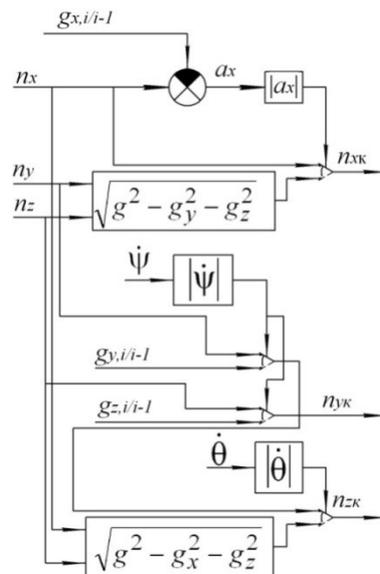


Рис. 8. – Блок отключения коррекции

Алгоритм работы блока следующий:

1. В случае если разностный сигнал между показанием акселерометра n_x и прогнозом фильтра Калмана $g_{x,i/i-1}$ превышает некоторое пороговое значение, n_x заменяется выражением $\sqrt{g^2 - g_y^2 - g_z^2}$.

2. В случае если угловая скорость тангажа $\dot{\theta}$ превышает некоторое пороговое значение, показание акселерометра n_y заменяется выражением $\sqrt{g^2 - g_x^2 - g_z^2}$.

3. В случае если угловая скорость курса ψ превышает некоторое пороговое значение, показания акселерометров n_z и n_y заменяются прогнозами фильтра Калмана $g_{y,i/i-1}$ и $g_{z,i/i-1}$.

4. Новые сформированные значения показаний акселерометров формируются на выходе блока.

Результаты математического моделирование работы (рис. 9а) РБСО с контуром отключения акселерометрической коррекции при движении БПЛА по траектории «коробочка» (рис. 9б) при пороговых значениях угловых скоростей тангажа и рыскания 1,5 градуса/с и пороговом значении продольного ускорения 0,01 g, показало эффективность работы блока.

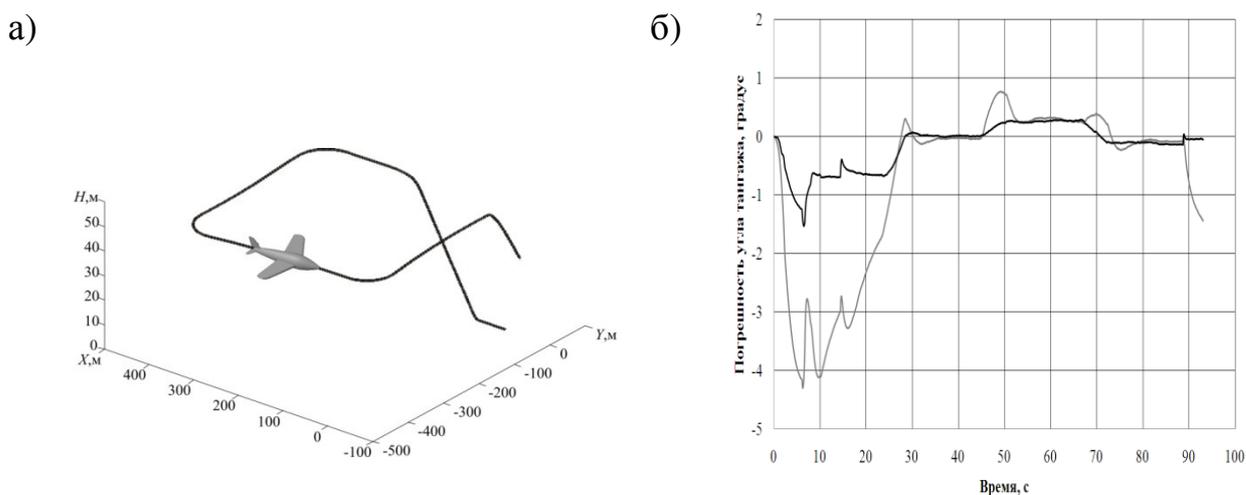


Рис. 9.– Результаты моделирования работы РБСО: а – моделируемая траектория движения БПЛА; б – погрешности РБСО (черный график – погрешность РБСО с блоком отключения коррекции, серый график – без блока отключения коррекции)

Таким образом, введение блока отключения коррекции обеспечивает улучшение точности РБСО при маневрировании БПЛА.

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы создано научное обоснование, на базе которого разработана бесплатформенная гировертикаль на отечественных инерциальных датчиках с микросистемными чувствительными элементами, которая может быть применена в качестве резервной системы ориентации для пилотируемых ЛА, и в качестве основной – для БПЛА.

В процессе выполнения исследований по теме диссертации получены результаты, наиболее значимые из которых следующие:

1. Бесплатформенная инерциальная гировертикаль, в которой комплексирование выполнено по неинвариантной схеме объединения сигналов инерциальных датчиков на базе фильтра Калмана, является схемотехнической основой для бесплатформенных систем ориентации пилотируемых

(резервная система) и беспилотных (основная система) летательных аппаратов.

2. Расчетные зависимости, позволяющие, исходя из требуемой точности РБСО по углам тангажа и крена и технических характеристик применяемых датчиков, рассчитать допустимое значение погрешности оценивания, а также систематическую и случайную погрешность РБСО по углам тангажа и крена.

3. Расчетные зависимости, позволяющие рассчитать значения дисперсии погрешности прогноза и дисперсии погрешности измерения без проведения математического моделирования с целью анализа погрешностей прогноза фильтра Калмана.

4. Расчетная зависимость, позволяющая по паспортным значениям инерциальных датчиков и шагу дискретизации системы рассчитать постоянную времени РБСО.

5. Так как измерительный модуль содержит триаду ортогонально расположенных гироскопов, ускорение вдоль любой из осей связанной системы координат ЛА, приведет к погрешности в выходном сигнале БСО. Устранение этой погрешности может быть выполнено алгоритмически.

6. Рассогласование систем координат ЛА и БСО (погрешность установки) приводит не только к возникновению постоянной составляющей погрешности БСО по одному из измеряемых углов ориентации, но и вызывает перекрестное влияние каналов крена и тангажа.

Указанная составляющая погрешности может быть устранена алгоритмом введения корректирующей матрицы, которая определяется с помощью разработанного метода после установки БСО в ЛА.

7. Коэффициент передачи фильтра Калмана и постоянная времени РБСО ограничиваются допустимым значением погрешности оценивания и определяются шагом дискретизации и случайными погрешностями применяемых датчиков угловой скорости.

8. Для улучшения точности РБСО в динамическом режиме движения ЛА целесообразно предусмотреть контур отключения акселерометрической коррекции по критериям предельных значений линейного ускорения и угловых скоростей движения ЛА.

9. Результаты испытаний РБСО с отечественными инерциальными датчиками в ФГУП «ГосНИИАС» показали, что РБСО работоспособна и устойчиво функционирует при длительных режимах эксплуатации (до 10 ч).

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях ВАК:

1. Парамонов П.П. Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата / П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, А.В. Шукалов, В.В. Матвеев, В.Я. Распопов // Мехатроника, автоматизация, управление.- 2012.- №10.- С.60-67. – 0,5 п.л./0,12 п.л.

2. Распопов В.Я. Влияние параметров датчиков на точность работы бесплатформенной инерциальной гировертикали/В.Я.Распопов, Ю.В.Иванов, Р.В. Алалуев, А.В. Шукалов, М.Г. Погорелов, А.П. Шведов// Датчики и системы.- 2011.- №8.- С.18-21.- 0,25 п.л./0,05 п.л.

3. Распопов В.Я. Анализ результатов испытаний резервной бесплатформенной системы ориентации/ В.Я. Распопов, П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, А.В. Шукалов, А.П. Шведов//Известия Тульского государственного университета. Серия «Технические науки».- 2012.- вып. 12, ч.1. - С.174-179.- 0,37 п.л./0,11 п.л.

4. Парамонов П.П. Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественной измерительной базе/ П.П. Парамонов, А.В. Шукалов, Ю.И. Сабо, В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, А.П. Шведов, А.В. Ладонкин, В.В. Матвеев // Гироскопия и навигация.- 2012. - №3. - С.122.- 0,062 п.л./0,01 п.л.

5. Шукалов А.В. Повышение точности резервной бесплатформенной системы ориентации на отечественных чувствительных элементах, изготовленных с применением *MEMS*-технологий/А.В.Шукалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.- 2014.- №4 (306). – С. 149-153. – 0,25 п. л.

Публикации в прочих изданиях:

6. Парамонов П.П. Авионика малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / П.П. Парамонов, В.Я. Распопов, Ю.И. Сабо, А.В. Шукалов // Аэрокосмический курьер.- 2010. - №3-4 (69-70). - С.46-49.- 0,25 п.л./0,04 п.л.

7. Распопов В.Я. Комплексированные микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов/ В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, Р.В. Алалуев, В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, А.В. Ладонкин, А.П. Шведов, П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, А.В. Шукалов//XVIII Санкт-Петербургская международная конференции по интегрированным навигационным системам: СПб, ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»: Сб.научных трудов.- 2011.- С.161-169.- 0,56 п.л./0,005 п.л.

8. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов: монография/Р.В. Алалуев [и др.] Под ред. В.Я. Распопова - Москва: Машиностроение, 2011.- 184 с.- 11,5 п.л./0,03 п.л.

Патенты и авторские свидетельства

9. Патент на полезную модель №108868 U1 RU./А.В. Богданов, Г.А. Васильев, П.С.Виноградов, К.А. Егоров, А.Н. Зайченко, И.В. Ковернинский, В.И. Петухов, А.Н. Романов, Е.В. Смирнов, Б.В. Уткин, Е.А. Федосов, А.В. Шукалов. Заявл.01.06.2011; опубл. 27.09.2011 (Бюл.27).