

На правах рукописи



ЛУЧКИНА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

**АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ, ПОСТРОЕННОЙ НА ГРУБЫХ ДАТЧИКАХ**

Специальность 05.11.16 –  
Информационно-измерительные и управляющие системы  
(в приборостроении)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре «Автоматика и управление».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Потапов Анатолий Андреевич**

Официальные оппоненты: **Литманович Юрий Аронович**,  
доктор технических наук, начальник  
отдела АО «Концерн «ЦНИИ  
«Электроприбор»

**Смирнов Владимир Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры "Приборы и биотехнические  
системы" ФГБОУ ВО "Тульский  
государственный университет"

Ведущее предприятие: АО «Инерциальные технологии  
«Технокомплекса», г. Раменское

Защита состоится «11» июня 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.079.06 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) по адресу: 420015, г. Казань, ул. Толстого, 15 (учебный корпус №3, ауд. 216).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, ученому секретарю заседания диссертационного совета Д.212.079.06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) и на сайте:  
[http://old.kai.ru/science/disser/files/file\\_268/text\\_diss.pdf](http://old.kai.ru/science/disser/files/file_268/text_diss.pdf)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.079.06,  
кандидат технических наук



Бердников Алексей Владимирович

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современном мире наблюдается расширение области применения беспилотной техники. Если первоначально беспилотные аппараты были задействованы исключительно в военной тематике, то сейчас их применение задействовано во всех передовых отраслях мировой экономики: начиная от роботизации производственных процессов, применения в медицине, геодезии, сельском хозяйстве, всех видов транспорта, заканчивая персональными "гаджетами" и роботизированной бытовой техникой.

Большинству беспилотных объектов для решения поставленных перед ними задач (в частности, для систем автоматического управления) необходима информация об угловом положении относительно местной географической системы координат, которая определяется информационно-измерительной системой определения угловой ориентации (ИИСОУО).

Анализ научно-технической литературы показал большое количество информации, посвященной алгоритмам определения ориентации и навигации объекта: П.В. Бромберг, Н.Т. Кузовков, О.С. Салычев, В.Н. Бранец, А.А. Голован, В.В. Матвеев, О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцев, Л.И. Августов, А.В. Бабиченко, Б.С. Алёшин, Ю.А. Литманович, D.H. Titterton, G.S. Mohinder, K.R. Britting, P.G. Savage, M. Kayton. В большинстве профильных публикаций оценку углов ориентации предлагается выполнять путем интегрирования сигналов триады датчиков угловых скоростей. Однако вследствие определенных условий эксплуатации, вероятно пропадание внешнего корректирующего сигнала (например, спутниковой радионавигационной системы), что приводит к быстро нарастающей во времени погрешности определения углов ориентации и сокращению времени автономной работы в случае построения ИИСОУО на грубых датчиках (MEMS-датчиках потребительского класса точности).

В связи с этим возникает проблема обеспечения требуемой точности автономного режима работы ИИСОУО, построенной на грубых датчиках. Для повышения точности автономной ИИСОУО, среди прочих возможных вариантов решения, наиболее гибким является использование информации от дополнительных датчиков, находящихся в составе объекта, применения алгоритмов оценки инструментальных погрешностей датчиков и алгоритмов комплексирования оценок.

Опыт работы по созданию автономных ИИСОУО для различных типов беспилотных летательных аппаратов показал, что, несмотря на интенсивность развития беспилотной техники, в открытых источниках существует определенный дефицит исследований, посвященных алгоритмам автономного определения углов ориентации. Так в исследованиях, посвященных разработке автономных ИИСОУО приводятся лишь состав, технические характеристики и результаты испытаний системы. В имеющихся же работах по разработке алгоритмов автономной ИИСОУО были приняты определенные допущения, заведомо приводящие к погрешности автономных оценок, в частности: не учет вектора переносной угловой скорости и вектора абсолютного линейного

ускорения объекта, отсутствие в режиме движения объекта оценки вариаций инструментальных погрешностей датчиков первичной информации.

Таким образом, работы по созданию алгоритмов автономного определения углов ориентации являются актуальными ввиду широкой потенциальной области применения автономных ИИСОУО, построенных на грубых датчиках.

В качестве дополнительных датчиков в диссертационной работе были выбраны триада магнитометров и датчики воздушных сигналов, как наиболее доступные и часто применяемые в составе беспилотных летательных аппаратов – объектов, для которых использование автономных ИИСОУО, построенных на грубых датчиках, является перспективным направлением развития, обусловленным техническими и экономическими факторами.

**Степень разработанности темы исследования.** Описание функционирования ИИСОУО в значительной степени базируется на теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем ориентации и навигации. Теоретические основы бесплатформенной инерциальной навигации с детальным изложением ее основ отражены в работах Н.Т. Кузовкова, О.С. Салычева, В.В. Матвеева, В.Я. Распопова, О.Н. Анучина, Г.И. Емельянцева, А.А. Голована, С.С. Ривкина, З.М. Бермана, D.H. Titterton, J.L. Weston, P.G. Savage, M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews, A. Lawrence, M. Kayton. Современные подходы построения ИИСОУО с использованием грубых инерциальных датчиков, выполненных по технологии MEMS, отражены в работах В.Я. Распопова, Л.А. Серова, В.К. Пономарева, А.И. Панферова, В.Г. Пешехонова, А.В. Никулина, В.В. Лихошерста. Алгоритмам оценки инструментальных погрешностей инерциальных датчиков посвящены работы Н.А. Парусникова, А.И. Матасова, А.В. Деревянкина, А.В. Козлова, Ю.Г. Егорова, Г.И. Джанджгавы, С.П. Редькина, А.В. Требухова, Б.В. Климовича, В.В. Аврутова, В.М. Слюсарь, J.W. Diesel. Вопросы решения задач определения ориентации с применением магнитометров описаны в работах Б.М. Явонского, Б.З. Михлина, А.А. Одинцова, В.В. Воронова, А.А. Потапова, В.А. Архипова, W. Denne, D. Gebre-Egziabher, J.L. Crassidis, J.F. Vasconcelos. Разработкой малогабаритных информационных систем, построенных с применением дополнительных датчиков (магнитометров, датчиков воздушных сигналов), занимаются как отечественные организации: ЦНИИ «Электроприбор», АО «ИТТ», ОАО «Темп-Авиа», ООО «Текнол», МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ЛМП» и др., так и зарубежные производители: Northrop Grumman, Honeywell, Analog Devices, Thales, SBG Systems, Advanced Navigation, Inertial Sense и др.

**Объектом исследования** является автономная ИИСОУО, построенная на грубых датчиках, обеспечивающая оценку углов ориентации без использования сигналов внешних информационных систем.

**Предметом исследования** являются алгоритмы автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, включающие алгоритмы использования информации с дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, алгоритмы оценки инструментальных погрешностей датчиков и их

вариаций в режиме движения объекта и алгоритмы комплексирования автономных оценок углов ориентации.

**Целью** диссертационной работы является повышение точности автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, за счет применения разработанных алгоритмов использования информации с дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, алгоритмов оценки инструментальных погрешностей датчиков и их вариаций в режиме движения объекта и алгоритмов комплексирования автономных оценок углов ориентации.

**Научная задача исследования** заключается в разработке научно-обоснованных алгоритмов автономной ИИСОУО, обеспечивающих повышение точности определения углов ориентации.

**Решение поставленной задачи** проводилось по следующим **основным направлениям**:

- анализ проблем создания автономных ИИСОУО, построенных на грубых датчиках; исследование вопроса построения алгоритмов автономной ИИСОУО, обеспечивающих повышение точности автономного определения углов ориентации;

- вывод математической модели методических погрешностей базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов автономной ИИСОУО, возникающих вследствие не учета векторов переносной угловой скорости (от вращения Земли и угловых скоростей изменения географических координат) и абсолютного линейного ускорения объекта (отклоняющего кажущуюся вертикаль от местной географической); анализ оказываемого методической погрешностью влияния на точность автономной оценки углов ориентации;

- разработка алгоритма оценки проекций вектора абсолютного линейного ускорения и вектора переносной угловой скорости с использованием информации от дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, необходимой для компенсации методической погрешности базовых алгоритмов автономной ИИСОУО;

- разработка алгоритмов повышения точности автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, в частности:

- 1) алгоритмов оценки компонент инструментальной погрешности датчиков угловых скоростей для проведения стендовой калибровки и оценки вариации инструментальной погрешности в режиме движения объекта, а именно: температурной аддитивной составляющей, систематической аддитивной составляющей, фильтрации случайной аддитивной составляющей типа «белый» шум и случайной аддитивной составляющей типа «цветной» шум, вызывающей смещение оценки систематической аддитивной составляющей;

- 2) алгоритма оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальной погрешности акселерометров;

- 3) алгоритма оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальной погрешности магнитометров, учитывающих влияние магнитной девиации, а также алгоритма

оценки вариации детерминированной аддитивной составляющей в режиме движения объекта;

4) алгоритма комплексирования автономных оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей с оценками углов наклона по акселерометрам и оценкой угла курса по магнитометрам;

- разработка имитационных моделей, реализующих особенности динамики движения беспилотного летательного аппарата и учитывающих типовые значения инструментальных погрешностей грубых датчиков;

- проведение математического моделирования с использованием имитационных моделей для анализа разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО, сравнение полученных в результате математического моделирования точностей автономных оценок углов ориентации с характеристиками автономного режима работы современных ИИСОУО;

- обобщение результатов исследования, рекомендации по совершенствованию и развитию разрабатываемых алгоритмов автономных ИИСОУО, построенных на грубых датчиках.

**Методы исследования.** При решении поставленной проблемы научного исследования использовались методы теории инерциальной навигации, теории кинематики движения твердого тела, теории измерений, теории оценивания, методы комплексирования и оптимальной фильтрации, методы имитационного моделирования и экспериментального исследования.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется следующими результатами:

1) разработанной структурой алгоритмов ИИСОУО, обеспечивающих повышение точности автономного (без внешнего корректирующего сигнала) определения углов ориентации;

2) разработанной математической моделью методических погрешностей базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов автономной ИИСОУО, позволяющей проводить анализ влияния оказываемого методическими погрешностями на точность автономной оценки углов ориентации;

3) разработанным алгоритмом оценки проекций векторов абсолютного линейного ускорения и переносной угловой скорости с использованием сигналов дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, необходимой для компенсации методических погрешностей базовых алгоритмов автономной ИИСОУО;

4) разработанными алгоритмами повышения точности автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, в частности:

- оценки инструментальных погрешностей датчиков угловых скоростей в режиме движения объекта с применением модернизированного расширенного фильтра Калмана, учитывающего характеристики подвижного объекта и одновременное присутствие в случайной аддитивной составляющей инструментальной погрешности компонент типа «белый» и «цветной» шум;

- автономной стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальных погрешностей акселерометров, основанной на применении метода наименьших квадратов,

модернизированного в части учета значения дисперсии случайной аддитивной составляющей инструментальной погрешности акселерометров;

- автономной стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальной погрешности магнитометров, учитывающих влияние магнитной девиации, и автономной коррекции вариации детерминированной аддитивной составляющей, обеспечивающей компенсацию влияния изменения магнитной обстановки в режиме движения объекта;

- комплексирования оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей с оценками углов наклона по акселерометрам и оценкой угла курса по магнитометрам, обеспечивающего компенсацию остаточного систематического ухода и случайной составляющей погрешностей оценок углов ориентации;

5) имитационными моделями, обеспечивающими адекватность выполнения отладки и анализа разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО за счет учета динамических параметров (моментов инерции) беспилотного летательного аппарата и типовых значений инструментальных погрешностей грубых датчиков.

**Практическая ценность работы.** Основными результатами, определяющими практическую ценность работы, являются:

1) разработанные научно-обоснованные алгоритмы автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, обеспечивающие повышение точности оценки углов ориентации без использования сигналов внешних информационных систем;

2) разработанные имитационные модели, реализующие особенности динамики движения беспилотного летательного аппарата и учитывающие типовые значения инструментальных погрешностей грубых датчиков, обеспечивающие отладку и анализ разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО;

3) программная реализация алгоритмов, являющаяся частью имитационных моделей, позволяющая устранить ошибки конвертирования разрабатываемого алгоритма в программный код;

4) опыт реализации и внедрение научно-технических результатов исследования в работы по созданию автономных ИИСОУО, разрабатываемых АО НПО «ОКБ им. М.П. Симонова» (г. Казань);

5) рекомендации по совершенствованию и развитию алгоритмов автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках.

**Достоверность полученных научных результатов** определяется применением адекватных математических моделей, использованием современных методов анализа и синтеза информационно-измерительных систем, согласованностью основных теоретических предпосылок с результатами имитационного моделирования и эксперимента, опытом реализации и внедрения полученных научно-технических результатов. Полученные в диссертации результаты не противоречат известным результатам исследований других авторов.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы в виде программно-алгоритмического обеспечения были внедрены в производство на ОА НПО «ОКБ им. М.П. Симонова» (г. Казань). Разработанные алгоритмы повышения точности автономного определения углов ориентации были использованы в вычислительном устройстве экспериментальных, опытных и серийных образцов ИИСОУО, созданных на базе ОА НПО «ОКБ им. М.П. Симонова», проведены наземные и летные эксперименты в составе различных беспилотных летательных аппаратов, подтвердивших работоспособность разработанных алгоритмов.

Также результаты диссертационной работы внедрены в образовательную деятельность подготовки специалистов, проводимой кафедрой «Автоматики и управления» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИИТУ-КАИ) по направлениям подготовки: 24.03.02 "Системы управления движением и навигация" и 27.03.04 и 27.04.04 "Управление в технических системах" по профилю подготовки "Управление подвижными объектами".

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

**На защиту выносятся:**

1) разработанные математические модели методических погрешностей базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов автономной ИИСОУО;

2) разработанные алгоритмы оценки проекций вектора абсолютного линейного ускорения и вектора переносной угловой скорости с использованием сигналов дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, необходимой для компенсации базовых алгоритмов автономной ИИСОУО;

3) разработанные алгоритмы повышения точности автономной ИИСОУО, в частности:

- алгоритм стендовой оценки температурной аддитивной составляющей инструментальных погрешностей датчиков угловых скоростей, оценки в режиме движения объекта аддитивной систематической составляющей, фильтрации случайной аддитивной составляющей типа «белый» шум и компенсации смещения оценки, вызванной случайной аддитивной составляющей типа «цветной» шум, основанный на применении расширенного дискретного фильтра Калмана и линеаризованной модели движения объекта;

- алгоритм стендовой оценки систематических аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальных погрешностей магнитометров, учитывающих влияние магнитной девиации, алгоритм автономной коррекции вариации оценки аддитивной детерминированной систематической составляющей, вызванной изменением магнитной обстановки при движении объекта;

- алгоритм стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальных погрешностей акселерометров, основанный на методе наименьших квадратов, модернизированном в части учета значения дисперсии случайной аддитивной составляющей инструментальной погрешности акселерометров;



- алгоритм комплексирования оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей с оценками углов наклона по показаниям акселерометров и оценкой угла курса по показаниям магнитометров, основанный на модернизированной классической схеме комплексирования двух позиционных сигналов;

4) разработанные имитационные модели, учитывающие особенности динамики типового профиля полета беспилотного летательного аппарата и значения инструментальных погрешностей, присущие выбранным типам датчиков, обеспечивающие адекватность выполнения отладки и анализа разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на Международной молодёжной конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2009, 2011 гг.), Международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование (АКТО-2010)» (Казань, 2010), Российской научно-технической конференции "Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности: НГО-2011" (Санкт-Петербург, 2011), Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2011)» (Казань, 2011), Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» (Казань, 2012); XXI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, 2019).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в 7 сборниках трудов конференций.

**Личный вклад автора** заключается в научно-обоснованном предложении построения алгоритмов автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, в разработке математической модели методических погрешностей базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов автономной ИИСОУО, в разработке алгоритма оценки проекций векторов переносной угловой скорости и абсолютного линейного ускорения движения объекта с использованием дополнительных сигналов магнитометров и датчиков воздушных сигналов, в разработке алгоритмов оценки компонент инструментальных погрешностей датчиков для проведения стендовой калибровки и калибровки в режиме движения объекта, в разработке имитационных моделей и программной реализации разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО, в личном участии в проведении стендовых и натурных испытаний алгоритмов автономной ИИСОУО в составе изделий (беспилотных летательных аппаратов различного типа), в определении рекомендаций по дальнейшему совершенствованию и развитию алгоритмов автономной ИИСОУО, в апробации и опубликовании результатов исследований.

**Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.11.16:** по пункту 1 – Научное обоснование перспективных

информационно-управляющих систем, систем их контроля, испытания и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем; по пункту 6 – Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, списка использованной литературы из 159 наименований и приложения. Основное содержание диссертации изложено на 130 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы и 22 рисунка.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, объект и предмет исследования, сформулированы цель работы и научная проблема исследования, направления ее решения, раскрываются методы исследования, научная новизна и практическая ценность диссертации, обосновывается их достоверность, приводятся сведения о реализации и внедрении результатов работы, их апробации и опубликовании, а также основные положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

В **первой главе** приводится классификация, состав и особенности функционирования автономных ИИСОУО, рассматривается традиционный подход к решению задачи оценки углов ориентации (УО) в бесплатформенных информационно-измерительных системах.

Проведенный в первой главе анализ задачи повышения точности автономной оценки УО ИИСОУО, построенной на базе инерциальных датчиков с низкими точностными характеристиками, показал необходимость введения следующих алгоритмов:

- алгоритма компенсации за счет использования сигналов дополнительных триады магнитометров (ТМ) и датчиков воздушных сигналов (ДВС) методических погрешностей (МП) базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов, возникающих вследствие не учета проекций векторов переносной угловой скорости и абсолютного линейного ускорения;

- алгоритма определения дополнительной оценки угла курса с использованием сигналов ТМ;

- алгоритма оценки инструментальных погрешностей (ИП) датчиков первичной информации (ДПИ), включающих оценку вариаций аддитивных составляющих ИП в режиме движения объекта ввиду особенностей грубых ДПИ и вследствие возможного изменения магнитной обстановки;

- алгоритма комплексирования, обеспечивающего компенсацию остаточных погрешностей автономных оценок УО.

На рисунке 1 представлена блок-схема автономной ИИСОУО, содержащая разработанные алгоритмы (выделены в схеме серым цветом). Предлагаются следующие этапы автономного определения углов ориентации:

1) этап обработки измерительных сигналов, включающий алгоритмы оценки ИП ДПИ, в том числе коррекция оценок аддитивных составляющих ИП ДПИ в режиме движения объекта;

2) этап формирования автономных оценок УО, включающий алгоритмы компенсации МП базовых алгоритмов автономной ИИСОУО и также определения дополнительной оценки угла курса, за счет использования сигналов дополнительных датчиков ТМ и ДВС;

3) этап определения результирующей оценки, включающий алгоритм комплексирования оценок УО по сигналам ТД с оценками УН по сигналам ТА и оценкой угла курса по сигналам ТМ.

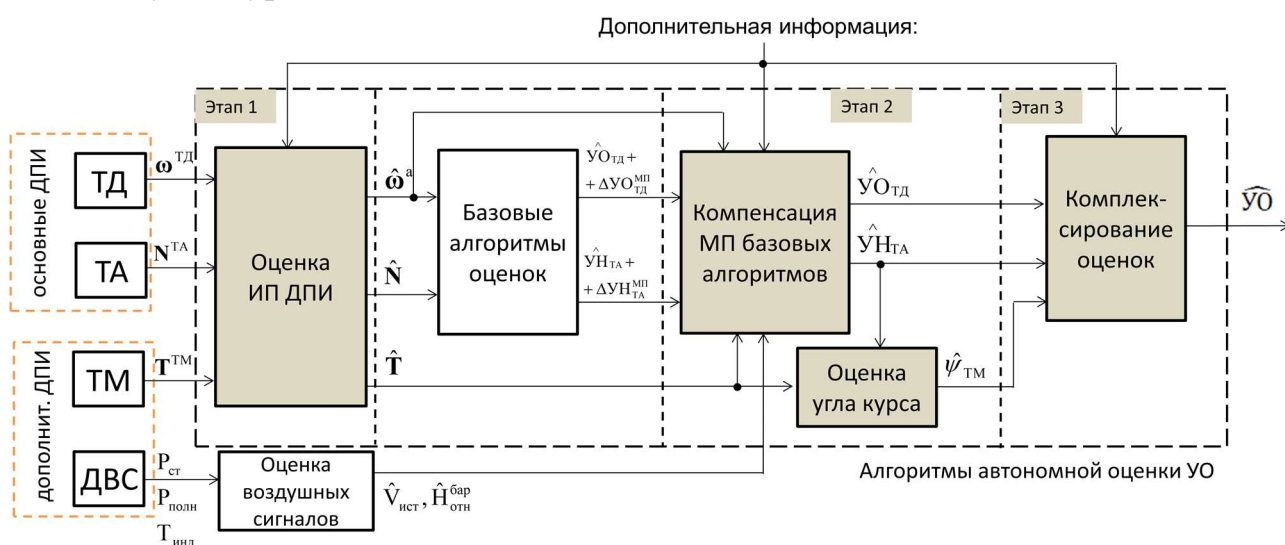


Рисунок 1. Блок-схема автономной ИИСОУО

( $\omega^{ТД}$ ,  $N^{ТА}$ ,  $T^{ТМ}$  - показания ТД, ТА и ТМ соответственно;  $P_{ст}$ ,  $P_{полн}$ ,  $T_{инд}$  - показания ДВС канала статического, полного давлений и индикаторной температуры соответственно;  $\hat{\omega}^a$ ,  $\hat{N}$ ,  $\hat{T}$  - оценки проекций на оси чувствительности триады ДПИ векторов абсолютной угловой скорости, кажущегося ускорения и напряженности геомагнитного поля соответственно;  $\hat{V}_{ист}$ ,  $\hat{H}_{отн}^{бар}$  - оценки истинной воздушной скорости и относительной барометрической высоты соответственно;  $U_{ТД}^{\hat{}}$ ,  $U_{ТА}^{\hat{}}$ ,  $\hat{\psi}_{ТМ}$  - автономные оценки УО;  $\Delta U_{ТД}^{\hat{}}$ ,  $\Delta U_{ТА}^{\hat{}}$  - методические погрешности базовых алгоритмов автономных оценок УО;  $\hat{U}^{\hat{}}$  - результирующая оценка УО)

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей (ММ) базовых алгоритмов автономных оценок УО по показаниям триады датчиков угловых скоростей (ТД) и автономных оценок углов наклона (УН) по показаниям триады акселерометров (ТА); разработке ММ МП базовых алгоритмов; проведен анализ влияния, оказываемого МП на точность оценок УО по показаниям инерциальных датчиков.

Также в текущей главе представлены разработанные алгоритмы использования сигналов дополнительных датчиков ТМ и ДВС, необходимых для обеспечения повышения точности автономной ИИСОУО: разработке алгоритма оценки проекций на связанную с объектом систему координат (СвСК) векторов абсолютного линейного ускорения и переносной угловой скорости и также определения дополнительной автономной оценки угла курса.

Принимая в диссертационной работе форму представления УО в виде углов Эйлера-Крылова (углы тангажа  $\vartheta$ , крена  $\gamma$ , рыскания  $\psi$ ), базовый алгоритм автономной оценки УО по сигналам ТД представится в виде дифференциальных уравнений углов Эйлера.

Ввиду того, что ТД измеряют проекции вектора абсолютной угловой скорости объекта  $\omega^a$ , отсутствие учёта в базовом алгоритме вектора переносной угловой скорости (от вращения Земли и от скорости облета Земли)  $\omega_g = [\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}]^T$  приводит к нарастающим во времени МП. Получена ММ МП базового алгоритма оценки УО по показаниям ТД, определяемая следующим дифференциальным уравнением:

$$[\Delta\dot{\gamma}_{ТД}^{МП}, \Delta\dot{\psi}_{ТД}^{МП}, \Delta\dot{\vartheta}_{ТД}^{МП}]^T = \Delta\hat{C}_{ТД}^T \cdot C_{ТД} \cdot [\dot{\gamma}, \dot{\psi}, \dot{\vartheta}]^T + (C_{ТД} + \Delta\hat{C}_{ТД})^T \cdot C_{cg} \cdot [\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}]^T \quad (1)$$

где  $C_{ТД} = [1, -c_\gamma \cdot t_\vartheta, s_\gamma \cdot t_\vartheta; 0, c_\gamma/c_\vartheta, -s_\gamma/c_\vartheta; 0, s_\gamma, c_\gamma]$ ;

$$\Delta\hat{C}_{ТД} = \begin{bmatrix} 0, & s_\gamma \cdot t_\vartheta \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} - c_\gamma/c_\vartheta^2 \cdot \Delta\vartheta_{ТД}^{МП}, & -c_\gamma \cdot t_\vartheta \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} + s_\gamma/c_\vartheta^2 \cdot \Delta\vartheta_{ТД}^{МП}; \\ 0, & -s_\gamma/c_\vartheta \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} + c_\gamma \cdot s_\vartheta/c_\vartheta^2 \cdot \Delta\vartheta_{ТД}^{МП}, & -c_\gamma/c_\vartheta \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} - s_\gamma \cdot s_\vartheta/c_\vartheta^2 \cdot \Delta\vartheta_{ТД}^{МП}; \\ 0, & c_\gamma \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} & -s_\gamma \cdot \Delta\gamma_{ТД}^{МП} \end{bmatrix};$$

$C_{cg}$  - матрица направляющих косинусов (МНК) ориентации объекта относительно местной географической системы координат (МГСК);

$\Delta\gamma_{ТД}^{МП}, \Delta\psi_{ТД}^{МП}, \Delta\vartheta_{ТД}^{МП}$  - МП базового алгоритма оценок по показаниям ТД углов крена, рыскания и тангажа соответственно;

$$s_x = \sin(x), c_x = \cos(x), t_x = \tan(x).$$

Отсутствие учёта в базовом алгоритме автономной оценки УО по показаниям ТД вектора переносной угловой скорости приводит к нарастающей во времени МП, скорость ухода которой будет тем больше, чем больше линейная скорость объекта относительно Земли.

Базовый алгоритм автономной оценки УН основывается на соотношениях проекций вектора ускорения гравитационного поля Земли  $\mathbf{g}$  на СвСК.

Поскольку ТА – датчики «кажущегося ускорения», в случае отсутствия в алгоритме учета проекций на СвСК вектора абсолютного линейного ускорения  $\mathbf{A} = [a_x, a_y, a_z]^T$ , результаты базового алгоритма автономной оценки УН по показаниям ТА будут содержать МП, ММ которых определяются следующими уравнениями:

$$\Delta\vartheta_{ТА}^{МП} = (s_\vartheta \cdot \mathbf{g} - a_x) / (s_\vartheta \cdot (s_\psi \cdot a_z^* - c_\psi \cdot a_x^*) + c_\vartheta \cdot a_y^*), \quad (2)$$

$$\Delta\gamma_{ТА}^{МП} = \frac{c_\gamma \cdot c_\vartheta \cdot \mathbf{g} - a_y - \frac{-c_\gamma \cdot c_\vartheta \cdot c_\psi \cdot a_x^* - c_\gamma \cdot s_\vartheta \cdot a_y^* + c_\gamma \cdot c_\vartheta \cdot s_\psi \cdot a_z^*}{-s_\vartheta \cdot c_\psi \cdot a_x^* + c_\vartheta \cdot a_y^* + s_\vartheta \cdot s_\psi \cdot a_z^*} \cdot (s_\vartheta \cdot \mathbf{g} - a_x)}{(s_\gamma \cdot s_\vartheta \cdot c_\psi + c_\gamma \cdot s_\psi) \cdot a_x^* - s_\gamma \cdot c_\vartheta \cdot a_y^* + (-s_\gamma \cdot s_\vartheta \cdot s_\psi + c_\gamma \cdot c_\psi) \cdot a_z^*}, \quad (3)$$

где  $[a_x^*, a_y^*, a_z^*]^T = C_{cg}^T \cdot A$ .

Отсутствие учёта в базовом алгоритме оценки УН по показаниям ТА вектора абсолютного ускорения приводит к МП, смещающей результат оценок УН тем больше, чем больше линейные ускорение и скорости объекта относительно Земли.

Таким образом, для обеспечения повышения точности автономной ИИСОУО, необходимо применение алгоритмов оценки проекций векторов  $\omega_g$  и  $A$  и определения дополнительной оценки угла курса с использованием сигналов дополнительных ТМ и ДВС.

Оценки проекций векторов  $\omega_g$  и  $A$  определяются в зависимости от информации о текущих значениях путевой скорости, путевого угла и географических координат местоположения объекта. В режиме автономной оценки предлагается применение косвенной оценки необходимых параметров за счёт сигналов ТМ и ДВС (барометрических датчиков полного  $P_{полн}$  и статического  $P_{стат}$  давлений, датчика заторможенного потока воздуха  $T_{инд}$ ).

Существуют различные способы повышения точности определения истинной воздушной скорости  $\hat{V}_{ист}$  и барометрической высоты  $\hat{H}_{бар}^{отн}$  относительно высоты начального местоположения объекта, в том числе за счёт применения схемы комплексирования сигналов ДВС и ТА. В текущей работе алгоритмы повышения точности данных оценок не рассматриваются, предлагается применение стандартных формул вычисления  $\hat{V}_{ист}$  и  $\hat{H}_{бар}^{отн}$ .

Пренебрегая влиянием изменения скорости ветра, предлагается следующая формула оценки проекции на СвСК вектора абсолютного ускорения:

$$\hat{A}_c = \hat{C}_V \cdot \hat{V}_{ист} + (\hat{\omega}^e + 2 \cdot \hat{U}) \times (\hat{C}_V \cdot \hat{V}_{ист} + \hat{C}_{cg}^{np} \cdot \hat{V}_{vg}^*) + \hat{U} \times (\hat{U} \times \hat{r}), \quad (4)$$

где  $\hat{C}_V = [c_{\hat{\beta}} \cdot c_{\hat{\alpha}}, -c_{\hat{\beta}} \cdot s_{\hat{\alpha}}, s_{\hat{\beta}}]^T$  - вектор оценки проекций  $\hat{V}_{ист}$  и  $\hat{V}_{ист}$  на СвСК;

$\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  - оценки углов атаки и скольжения (алгоритмы оценки аэродинамических углов в диссертационной работе не рассматриваются);

$\hat{C}_{cg}^{np}$  - МНК перехода от МГСК к СвСК, вычисленная с использованием предварительных оценок УО по откалиброванным показаниям ТД, ТА и ТМ;

$\hat{V}_{vg}^* = [W^* \cdot c_{ПУ^*}, \dot{H}^*, W^* \cdot s_{ПУ^*}]^T - C_{cg}^{np*T} \cdot \hat{C}_{ca}^* \cdot V_{ист}^*$  - оценка вектора ветра, определенная по начальным значениям путевой скорости  $W^*$ , путевого угла  $ПУ^*$ , истинной воздушной скорости  $V_{ист}^*$ , МНК перехода от скоростной системы координат (СкСК) к СвСК  $\hat{C}_{ca}^*$  и МНК перехода от СвСК к ГСТ  $C_{cg}^{np}$ ;

$\hat{U}$  - оценка вектора угловой скорости вращения Земли;

$\hat{r}$  - оценка геоцентрического радиуса-вектора местоположения объекта.

Для оценки проекций на СвСК вектора угловой скорости вращения МГСК относительно геоцентрической СК, жестко связанной с Землей,  $\hat{\omega}^e$  и вектора центростремительного ускорения  $\hat{U} \times (\hat{U} \times \hat{r})$  предлагается использовать общепринятые формулы, применяемые для вычисления геодезических координат при представлении земного геоида в виде эллипсоида вращения.

Для оценки проекций на СвСК вектора переносной угловой скорости предлагается следующее уравнение:

$$\hat{\omega}_{g_c} = \hat{C}_{cg}^{TAM} \cdot \left[ \left( U + (\hat{W} \cdot s_{\Pi\hat{y}}) / (\hat{R}_1 \cdot c_{\hat{\phi}}) \right) \cdot c_{\hat{\phi}}, \left( U + (\hat{W} \cdot s_{\Pi\hat{y}}) / (\hat{R}_1 \cdot c_{\hat{\phi}}) \right) \cdot s_{\hat{\phi}}, -(\hat{W} \cdot c_{\Pi\hat{y}}) / \hat{R}_2 \right]^T, \quad (5)$$

где  $\hat{C}_{cg}^{TAM}$  - оценка МНК перехода от МГСК к СвСК, вычисленная по значениям  $\hat{\theta}_{TA}, \hat{\gamma}_{TA}$  и угла курса  $\hat{\psi}_{TM}$ , определенного по откалиброванным показаниям ТМ и оценкам УН  $\hat{\theta}_{TA}, \hat{\gamma}_{TA}$ ;

$\hat{W} \cdot c_{\Pi\hat{y}}, \hat{W} \cdot s_{\Pi\hat{y}}$  - оценка проекций путевой скорости, определяется по оценкам  $\hat{\theta}_{TA}, \hat{\gamma}_{TA}$  и  $\hat{\psi}_{TM}, \hat{V}_{ист}$  и  $V_{вг}^*$ .

Радиус кривизны первого вертикала  $\hat{R}_1$ , радиус кривизны меридианного сечения  $\hat{R}_2$  и оценку географической широты  $\hat{\phi}$  предлагается определять с применением общепринятых формул, используемых при вычислении геодезических координат.

Для определения дополнительной оценки угла курса по показаниям ТМ были использованы результаты исследований, освещенные в соответствующей профильной литературе.

В третьей главе представлены разработанные алгоритмы автономной ИИСОУО: алгоритмы оценки ИП ДПИ для проведения стендовой калибровки ДПИ и калибровки ДПИ в режиме движения объекта (этап 1 блок-схемы на рисунке 1); алгоритм компенсации МП базовых алгоритмов (этап 2 блок-схемы); алгоритм комплексирования результатов оценок УО по сигналам ТД с оценками УН по показаниям ТА и оценки угла курса по показаниям ТМ (этап 3 блок-схемы).

1) Алгоритмы оценки компонент ИП ДПИ для проведения стендовой калибровки ДПИ и компенсации вариаций детерминированных аддитивных составляющих ИП ДПИ в режиме движения объекта.

Примечание: задача калибровки показаний ДВС в диссертационной работе не рассматривается.

1.1) Алгоритм оценки компонент ИП ТД.

В качестве ММ показаний ТД выбрана классическая форма представления, учитывающая основные компоненты ИП, оказывающие наибольшее влияние на точность автономных оценок УО:

$$\omega^{TD} = \omega^a + \Delta_{bias}^{TD} + \Delta_{temp}^{TD} + \Delta_{noise}^{TD}, \quad (6)$$

где  $\Delta_{bias}^{TD}$  - систематическая аддитивная составляющая ИП ТД;

$\Delta_{temp}^{TD}$  - температурная аддитивная составляющая ИП ТД;

$\Delta_{noise}^{TD}$  - случайная аддитивная составляющая ИП ТД.

Оценка детерминированной мультипликативной составляющей ИП ТД традиционно выполняется на этапе стендовой калибровки, применяя метод аппроксимации экспериментальных данных, полученных с использованием стенда, задающего эталонную угловую скорость согласно рабочему диапазону ТД. В текущей работе алгоритмы повышения точности оценок мультипликативной составляющей ИП ТД не рассматриваются.

Поскольку температурная аддитивная составляющая ИП ТД зачастую имеет стабильность картины проявления, оценка данной компоненты выполняется на этапе стендовой калибровки и представляется в виде полиномиальной функции:  $\Delta_{\text{temp}}^{\text{ТД}}(T) = \Delta_{\text{temp}}^{\text{ТД}}(T_0) + \sum_{i=1}^3 k_{\text{temp}_i}^{\text{ТД}} \cdot (T - T_0)^i$  (здесь  $T$  – показание внутреннего датчика температуры ТД,  $T_0$  – температура при нормальных климатических условиях,  $k_{\text{temp}_i}^{\text{ТД}}$  – коэффициенты полинома).

Для оценки составляющих ИП  $\Delta_{\text{bias}}^{\text{ТД}}$  и  $\Delta_{\text{noise}}^{\text{ТД}}$  применяется расширенный дискретный фильтр Калмана и использована линеаризованная модель движения объекта. Для адекватности представления случайной составляющей смещения нуля сигнала ТД, принимается следующая ММ компоненты ИП:  $\Delta_{\text{noise}}^{\text{ТД}} = \Delta_{\text{ARW}}^{\text{ТД}} + \Delta_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}$ , где  $\Delta_{\text{ARW}}^{\text{ТД}}$  – составляющая смещения нуля, типа «белый» шум, вызванная случайным угловым уходом (ARW) (ММ  $\Delta_{\text{ARW}}^{\text{ТД}}[n] = Q_{\text{ARW}} \cdot u_1$ ;  $\dot{\Delta}_{\text{ARW}}^{\text{ТД}}[n] = 0$ );  $\Delta_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}$  – составляющая смещения нуля, типа «цветной» шум, вызванная экспоненциально-коррелированным шумом (GMN) (ММ  $\Delta_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}[n] = \Delta_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}[n-1] + \dot{\Delta}_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}[n] \cdot \Delta t$ ;  $\dot{\Delta}_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}[n] = -\frac{1}{T_{\text{GMN}}} \Delta_{\text{GMN}}^{\text{ТД}}[n-1] + Q_{\text{GMN}} \cdot u_1$ ).

Ввиду принятого в ММ ИП ТД наличия «цветного» шума, выполняется модификация элементов оптимального фильтра Калмана с применением метода временного различия измерения. Однако классически для текущего метода рассматривается модель ошибок измерения, содержащая только «цветной» шум. В разработанном же алгоритме использована адекватная модель вектора измерения, дополнительно учитывающая «белый» шум. Предлагается построение модифицированного вектора измерения  $\zeta[n]$ , обеспечивающего присутствие только компоненты погрешности типа «белый» шум:  $\zeta[n] = z[n] - \Psi_{\text{GMN}}[n] \cdot z[n-1]$ , где  $z[n]$  – вектор измерения,  $\Psi_{\text{GMN}}$  – переходная функция GMN компоненты случайной составляющей смещения нуля ТД.

В отличие от других, часто описываемых в профильных публикациях, способах применения фильтра Калмана, разработанный алгоритм обеспечивает лучшие результаты за счет учета особенностей динамики движения объекта и использования актуальной модели измерения, учитывающей одновременное присутствие случайных аддитивных составляющих типа «белый» и «цветной» шум.

## 1.2) Алгоритм оценки компонент ИП ТМ.

В качестве ММ показаний ТМ выбрана классическая форма ее представления, учитывающая основные компоненты ИП, оказывающие наибольшее влияние на точность автономной оценки угла курса:

$$\mathbf{T}^{\text{TM}} = \mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{K}_{\text{NO}}^{\text{TM}} \cdot ((\mathbf{E} + \mathbf{S}\mathbf{I}^{\text{TM}}) \cdot \mathbf{C}_{\text{cg}} \cdot \mathbf{T}_{\text{g}} + \mathbf{H}\mathbf{I}^{\text{TM}}) + \Delta_{\text{bias}}^{\text{TM}} + \Delta_{\text{noise}}^{\text{TM}}, \quad (7)$$

где  $\Delta_{\text{bias}}^{\text{TM}}$  – систематическая аддитивная составляющая ИП ТМ;

$\mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{TM}}$ ,  $\mathbf{K}_{\text{NO}}^{\text{TM}}$  – детерминированные мультипликативные составляющие ИП ТМ;

$\Delta_{\text{noise}}^{\text{TM}}$  – случайная аддитивная составляющая ИП ТМ;

$\mathbf{T}_g$  - вектор напряженности магнитного поля Земли.

Также в ММ показаний ТМ учитываются параметры магнитной девиации:

$\mathbf{H}^{\text{TM}}$  - вектор магнитотвердого железа, параметры которого не зависят от ориентации в магнитном поле Земли, являющийся следствием влиянием ферромагнитных масс ИИСОУО и подвижного объекта;

$\mathbf{S}^{\text{TM}}$  - вектор магнитомягкого железа, параметры которого зависят от ориентации в магнитном поле Земли, являющийся следствием влиянием ферромагнитных масс ИИСОУО и подвижного объекта.

Поскольку для осуществления успешной калибровки ТМ, не обязательно идентифицировать вклад каждой компоненты в общую ИП, компоненты ИП ТМ сгруппированы:

$\mathbf{D}^{\text{TM}} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{S}^{\text{TM}}) = \mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{K}_{\text{NO}}^{\text{TM}} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{S}^{\text{TM}})$  - матрица искажения;

$\mathbf{o}^{\text{TM}} = \mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{K}_{\text{NO}}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{H}^{\text{TM}} + \Delta_{\text{bias}}^{\text{TM}}$  - вектор смещения.

Поскольку, опуская компоненту случайной аддитивной погрешности, ММ показаний ТМ преобразуется в уравнение эллипсоида  $(\mathbf{T}^{\text{TM}} - \mathbf{o}^{\text{TM}})^T \cdot \mathbf{A}^{\text{TM}} \cdot (\mathbf{T}^{\text{TM}} - \mathbf{o}^{\text{TM}}) = \|\mathbf{T}_g\|^2$ , калибровка ТМ сводится к определению оптимальных значений следующих параметров эллипсоида: координаты центра эллипсоида  $\mathbf{o}^{\text{TM}}$ , задающего смещение, и матрицы  $\mathbf{A}^{\text{TM}}$ , задающей линейное преобразование (растяжение и поворот -  $\mathbf{S}^{\text{TM}}$  и  $\mathbf{D}^{\text{TM}}$  соответственно) эллипсоида в сферу – тела, определяющего показания ТМ в случае отсутствия ИП.

Для определения параметров эллипсоида принимается следующая форма модели эллипсоида в виде:  $\mathbf{T}^{\text{TM}T} \cdot \mathbf{A}^{\text{TM}*} \cdot \mathbf{T}^{\text{TM}} + \mathbf{b}^{\text{TM}*T} \cdot \mathbf{T}^{\text{TM}} + \mathbf{d}^{\text{TM}*} = 0$  ( $\mathbf{A}^{\text{TM}*} > 0$ ), что обеспечит линеаризацию задачи оптимального поиска. Принимая модель случайной аддитивной составляющей в виде «белый» шум, и применяя метод наименьших квадратов, модернизированный в части учета значения дисперсии данной компоненты  $\Delta_{\text{noise}}^{\text{TM}}$ , определяются оценки параметров  $\hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}*}$ ,  $\hat{\mathbf{b}}^{\text{TM}*}$ ,  $\hat{\mathbf{d}}^{\text{TM}*}$ , по значениям которых вычисляются оценки исходных параметров эллипсоида:  $\hat{\mathbf{o}}^{\text{TM}} = -1/2 \cdot \mathbf{A}^{\text{TM}*^{-1}} \cdot \hat{\mathbf{b}}^{\text{TM}*}$ ,  $\hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}} = \hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}*} / (\hat{\mathbf{o}}^{\text{TM}T} \cdot \hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}*} \cdot \hat{\mathbf{o}}^{\text{TM}} - \hat{\mathbf{d}}^{\text{TM}*})$ . По сравнению с классическим методом наименьших квадратов, ввиду учета значения дисперсии, предложенный алгоритм позволяет получить приемлемую сходимость к истинным значениям при небольшом объеме выборки.

Для определения минимальных значений собственных чисел и связанных с ними собственных векторов матрицы  $\hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}}$  применяются инструменты сингулярного разложения, представляющего факторизацию матрицы в произведение:  $\hat{\mathbf{A}}^{\text{TM}} = \mathbf{U}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{S}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{V}^{\text{TM}T}$ , где  $\mathbf{U}^{\text{TM}} = \mathbf{V}^{\text{TM}}$  - унитарные, ортогональные матрицы, содержащие собственные вектора, соответствующие собственным числам;  $\mathbf{S}^{\text{TM}}$  - диагональная матрица, содержащая собственные числа.

Однако матрицы сингулярного разложения напрямую не равны оценкам матриц растяжения  $\hat{\mathbf{S}}^{\text{TM}}$  и поворота осей эллипсоида  $\hat{\mathbf{D}}^{\text{TM}}$ . Для каждой комбинации соответствия осей эллипсоида собственных чисел  $\mathbf{S}^{\text{TM}}(1,2,3)$  и знаков соответствующих собственных векторов  $\pm \mathbf{U}^{\text{TM}}(1,2,3)$  эллипсоида определяются средние значения алгебраического расстояния между модельным (эталонным) и измеренным ТМ векторами напряженности магнитного поля



Земли  $\Delta_i^{\text{TM}}$ ,  $i = (1...36)$ . Комбинация собственных чисел и знаков собственных векторов, соответствующая минимальному значению алгебраического расстояния, будет определять оценку детерминированных мультипликативных составляющих компонент ИП ТМ:

$$\hat{\mathbf{D}}^{\text{TM}} = \left( \mathbf{U}^{\text{TM}}_{\{\Delta_i^{\text{TM}} = \min\}} \right)^T)^{-1}, \quad \hat{\mathbf{S}}\mathbf{I}^{\text{TM}} = \left( \sqrt{\mathbf{S}^{\text{TM}}_{\{\Delta_i^{\text{TM}} = \min\}} \right)^T)^{-1} - \mathbf{E}. \quad (8)$$

Вследствие наличия возможного изменения магнитной обстановки в процессе движения объекта, фактические значения ИП ТМ могут не соответствовать значениям погрешностей, оцененных ранее. При этом ввиду изменения величины компоненты  $\Delta_{\text{bias}}^{\text{TM}}$  от запуска к запуску, значительное влияние на точность измерений ТМ оказывают аддитивные составляющие ИП. Поэтому для сохранения точности измерений ТМ необходимо применение алгоритмов коррекции оценки систематической аддитивной составляющей ИП, выполненной ранее (на этапе стендовой калибровки).

Разработанный алгоритм коррекции оценки аддитивной составляющей базируется на общеизвестном методе ТАМСАЛ, модернизированном в части учета в функции невязки мультипликативной составляющей ИП ТМ:

$$J(\mathbf{o}_{\text{факт}}^{\text{TM}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left( \left| \mathbf{K}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{T}_i^{\text{TM}} \right|^2 - 2 \cdot (\mathbf{K}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{T}_i^{\text{TM}})^T \cdot \mathbf{o}_{\text{факт}}^{\text{TM}} + \left| \mathbf{K}^{\text{TM}} \cdot \mathbf{o}_{\text{факт}}^{\text{TM}} \right|^2 - \left| \mathbf{T}_g \right|^2 \right)^2, \quad (9)$$

где  $\mathbf{o}_{\text{факт}}^{\text{TM}}$  - фактическое значение аддитивной составляющей ИП ТМ;

$$\mathbf{K}^{\text{TM}} = \left( \hat{\mathbf{D}}^{\text{TM}} \cdot (\mathbf{E} + \hat{\mathbf{S}}\mathbf{I}^{\text{TM}}) \right)^{-1} - \text{оценка мультипликативной составляющей ИП ТМ}$$

по результатам стендовой калибровки ТМ.

Для определения коррекции оценки  $\hat{\mathbf{o}}_{\text{факт}}^{\text{TM}}$ , предлагается использовать численный итеративный метод определения минимума функции – метод градиентного спуска. Текущий алгоритм, за счет учета оценки мультипликативной ИП, обеспечивает лучшие точности, по сравнению с другими алгоритмами автономной калибровки, использующими упрощенную ММ показаний ТМ.

### 1.3) Алгоритм оценки компонент ИП ТА.

В качестве ММ показаний ТА выбрана классическая форма представления, учитывающая основные компоненты ИП, оказывающие наибольшее влияние на точность автономных оценок УО:

$$\mathbf{N}^{\text{ТА}} = \mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{ТА}} \cdot \mathbf{N}_g + \Delta_{\text{bias}}^{\text{ТА}} + \Delta_{\text{noise}}^{\text{ТА}}, \quad (10)$$

где  $\Delta_{\text{bias}}^{\text{ТА}}$  - систематическая аддитивная составляющая ИП ТА;

$\Delta_{\text{noise}}^{\text{ТА}}$  - случайная аддитивная составляющая ИП ТА;

$\mathbf{K}_{\text{SF}}^{\text{ТА}}$  - детерминированная мультипликативная составляющая ИП ТА.

Для автономной стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих ИП ТА разработан алгоритм, аналогичный алгоритму стендовой оценки ИП ТМ, с поправкой на то, что при отсутствии ускорения и скорости относительно Земли, ТА измеряет вектор ускорения силы тяжести.

2) Алгоритм компенсации МП заключается в учете в базовых алгоритмах автономных оценок УО результата оценок проекций на СвСК векторов абсолютного линейного ускорения  $\hat{\omega}_g$  и переносной угловой скорости  $\hat{A}$ .

3) Алгоритм комплексирования автономных оценок УО.

Для обеспечения компенсации остаточных погрешностей автономных оценок УО применяется алгоритм комплексирования оценок УО по сигналам ТД с оценками УН по сигналам ТА и оценкой угла курса по сигналам ТМ. В качестве основы алгоритма применяется классическая схема комплексирования двух позиционных сигналов (рисунок 2), модернизированная в части:

- введения в схему устранения влияния «выбросов» оценок УО по ТА и ТМ, за счет ограничения величины коррекции (за счет нелинейного звена – блок «НЗ» на схеме) и учета переходных процессов при смене режима движения объекта (коэффициенты  $k_{упр}$ );
- введения компенсации остаточного дрейфа оценок УО по ТД.

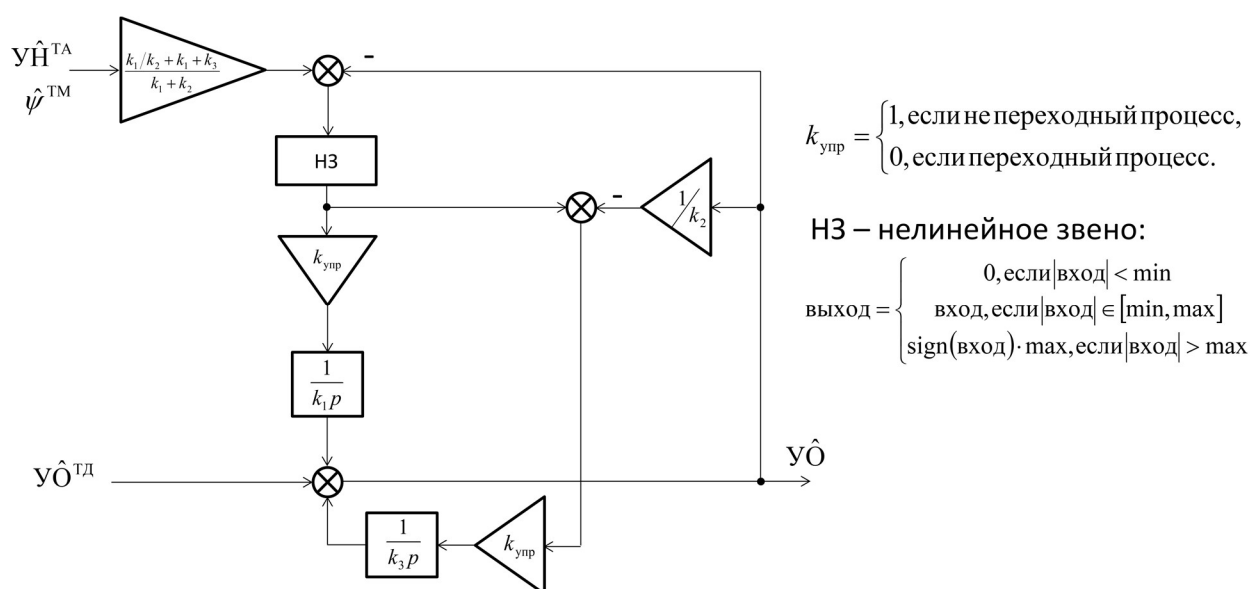


Рисунок 2. Схема алгоритма комплексирования оценок УО

В четвертой главе представлены результаты анализа разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках: представлены разработанные ИМ, включающие реализацию разработанных алгоритмов, учитывающие особенности динамики движения существующего БПЛА и типовые значения ИП, присущие грубым ДПИ, приводятся результаты моделирования.

В качестве условий движения объекта был выбран профиль полета БПЛА, содержащий маневры в боковой и в продольной плоскостях (рисунок 3). При моделировании показаний ДПИ в ИМ учитывались значения ИП, соответствующие грубым датчикам. Значения ИП выбирались согласно техническим характеристикам следующих ИИСОУО: ADIS16405 (Analog Devices, США), Ellipse2-A (SBG Systems, США), Spatial (Advanced Navigation, Австралия),  $\mu$ AHRS (Inertial Sense, США), ГKB-10 (Лаборатория Микроприборов, Россия).

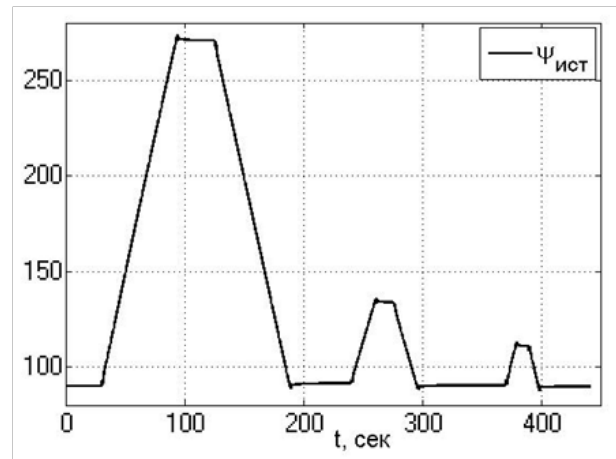
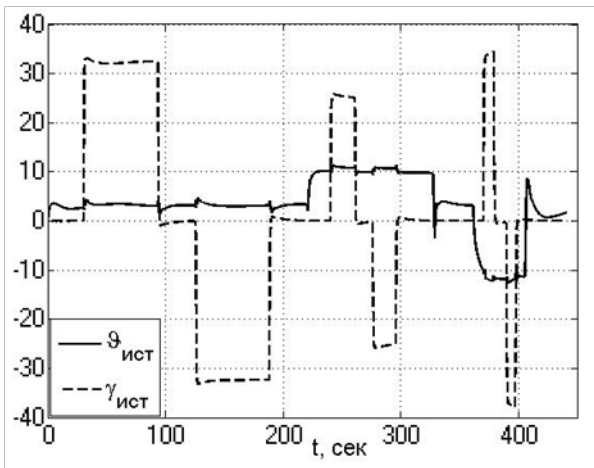
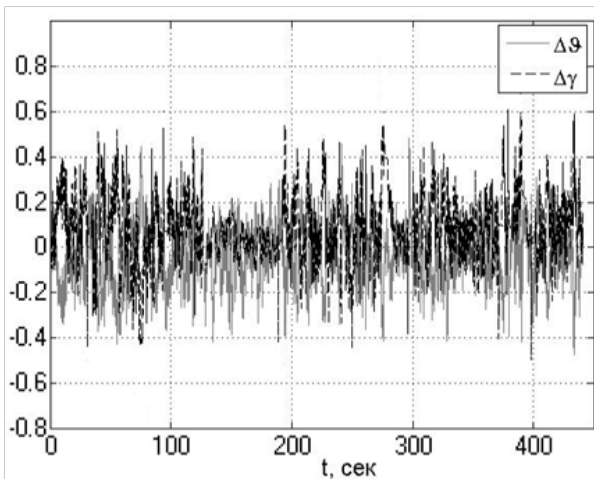


Рисунок 3. Моделируемые истинные значения УО БПЛА, градус

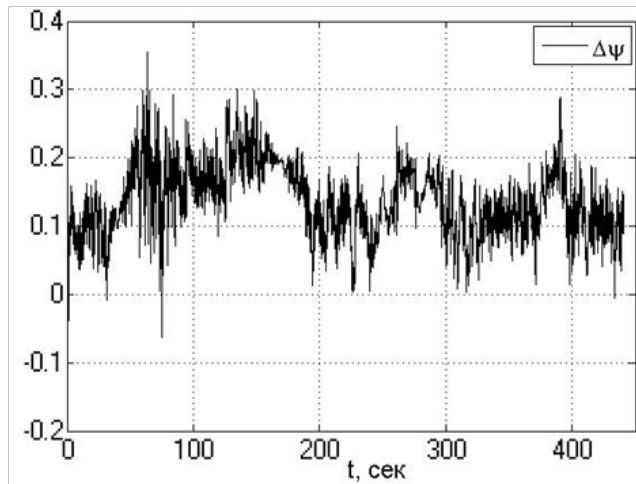
Согласно результатам анализа, применение разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО обеспечивает следующие значения абсолютных погрешностей результирующих автономных оценок, приведенные в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1. Погрешности результирующих автономных оценок УО БПЛА

Погрешность, градус	$\hat{\theta}$	$\hat{\gamma}$	$\hat{\psi}$
Математическое ожидание	-0,0414	0,0559	0,1584
Дисперсия, $1\sigma$	0,1149	0,1146	0,0551



а) УН



б) угол курса

Рисунок 4. Графики абсолютной погрешности автономных оценок УО, градус

По сравнению с характеристиками автономной работы существующих ИИСОУО (таблица 2), разработанные алгоритмы обеспечивают:

- точность оценок УН выше по сравнению с отечественной ИИСОУО и аналогичную ИИСОУО зарубежных производителей;
- точность оценки угла курса, на порядок выше отечественной и зарубежных ИИСОУО.

Таблица 2. Значения погрешностей оценок УО существующих ИИСОУО

Погрешность, градус	ГКВ-10 (ООО «ЛМП», Россия)	Ellipse2-E (SBG Systems, США)	Spatial (Advanced Navigation, Австралия)	μAHRIS (Inertial Sense, США)	Результат применения алгоритмов
Погрешность УН, $\sigma$	0,2 (в стат.) 0,3 (в дин.)	0.1			0.1
Погрешность курса (в комплексе с ТМ), $\sigma$	1.0	0.8		2.0	0.06

Также эффективность разработанных алгоритмов подтверждается успешным применением их в составе функционального программного обеспечения пилотажно-навигационного комплекса БПЛА (АО НПО «ОКБ им. М.П. Симонова», г. Казань), обеспечивших удешевление изделия за счёт исключения из состава комплекса бортового оборудования дорогостоящего гироскопического датчика вертикали.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализирована задача построения алгоритмов автономной (без внешнего корректирующего сигнала) ИИСОУО, построенной на грубых датчиках.

2. Разработаны математические модели методических погрешностей базовых (на основе инерциальных датчиков) алгоритмов автономной оценки углов ориентации, возникающих вследствие не учёта вектора переносной угловой скорости и вектора абсолютного линейного ускорения объекта, выполнен анализ влияния оказываемого методическими погрешностями влияния на точность автономной оценки углов ориентации.

3. Разработан алгоритм оценки проекций вектора абсолютного линейного ускорения и вектора переносной угловой скорости с использованием информации от дополнительных датчиков магнитометров и датчиков воздушных сигналов, необходимой для компенсации методической погрешности базовых алгоритмов автономной ИИСОУО.

4. Разработаны алгоритмы автономной ИИСОУО, обеспечивающие повышение точности оценки углов ориентации без использования сигналов внешних информационных систем, в частности:

- алгоритм оценки компонент инструментальной погрешности датчиков угловых скоростей для проведения стендовой калибровки и алгоритм компенсации вариаций компонент инструментальной погрешности в режиме движения объекта, построенный на базе модернизированного расширенного фильтра Калмана, учитывающего характеристики объекта и присутствие в случайной аддитивной составляющей инструментальной погрешности компонент типа «белый» и «цветной» шум, вызывающей смещение оценки систематической аддитивной составляющей;

- алгоритм автономной стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальных погрешностей триады

акселерометров, основанный на методе наименьших квадратов, модернизированном в части учета значения дисперсии случайной аддитивной составляющей инструментальной погрешности триады акселерометров;

- алгоритм автономной стендовой оценки детерминированных аддитивной и мультипликативной составляющих инструментальной погрешности триады магнитометров, учитывающих влияние магнитной девиации, и алгоритм автономной оценки вариации детерминированной аддитивной составляющей, обеспечивающий компенсацию влияния изменения магнитной обстановки в режиме движения объекта;

- алгоритм комплексирования автономных оценок углов ориентации, обеспечивающий компенсацию остаточного ухода оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей и уменьшение случайной составляющей погрешностей оценок углов наклона по сигналам акселерометров и оценки угла курса по магнитометрам.

5. Разработаны имитационные модели, учитывающие особенности динамики движения беспилотного летательного аппарата и типовые значения инструментальных погрешностей грубых датчиков, обеспечивающие адекватность выполнения отладки и анализа разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО.

6. Результаты математического моделирования и опыт применения предложенных разработанных алгоритмов автономной ИИСОУО, построенной на грубых датчиках, подтверждают достоверность полученных научных и научно-технических результатов и свидетельствует об эффективности разработанных алгоритмов.

#### **IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **В изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Лучкина Т.А. Повышение точности работы системы угловой ориентации подвижного объекта, построенной на базе волоконно-оптических датчиков угловых скоростей / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. - №7. – С. 3-7.

2. Лучкина Т.А. Повышение точности работы микромеханических датчиков угловых скоростей с низкими эксплуатационными характеристиками / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. - №2. – С. 18-25.

3. Лучкина Т.А. Алгоритмы предстартовой калибровки и автономной коррекции оценки аддитивных составляющих погрешностей триады магнитометров при движении подвижного объекта / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Датчики и системы. – 2019. - №2. – С. 3-9.

4. Лучкина Т.А. Повышение точности автономной оценки угловой ориентации подвижного объекта за счет применения датчиков измерения воздушных параметров и триады магнитометров / Т.А. Лучкина // Авиакосмическое приборостроение. – 2019. - №1. – С. 3-14.

**В других изданиях:**

5. Полякова (Лучкина) Т.А. Система определения угловой ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата по показаниям магнитометров и датчиков угловых скоростей // Материалы Международной молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения». – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – Т. III. – С. 173-175.

6. Полякова (Лучкина) Т.А. Алгоритмы определения углов ориентации подвижного объекта // Материалы V Международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование. Казань-2010» (АКТО-2010). – Казань, 2010. – С. 106-109.

7. Лучкина Т.А. Автономная система угловой ориентации подвижного объекта на базе акселерометров, датчиков угловых скоростей и магнитометров // Материалы Международной молодежной научной конференции «XIX Туполевские чтения». – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. III. – С. 318-320.

8. Лучкина Т.А. Автономная бесплатформенная система угловой ориентации маневренного подвижного объекта / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Труды VII Российской научно-технической конференции "Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности: НГО-2011". - СПб., 2011. - С. 210-216.

9. Потапов А.А. Об упрощении базовых алгоритмов автономных бесплатформенных систем определения угловой ориентации подвижных объектов / А.А. Потапов, Т.А. Лучкина // Труды VI Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2011). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. 2. – С. 181-187.

10. Потапов А.А. Повышение точности работы автономной бесплатформенной малогабаритной системы определения углов ориентации подвижного объекта за счет автоподстройки / А.А. Потапов, Т.А. Лучкина // Материалы X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление». – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – Т. 3. – С. 253-262.

11. Лучкина Т.А. Алгоритмы повышения точности автономного функционирования информационно-измерительной системы определения угловой ориентации подвижного объекта // Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». - СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл.печ.л.1,16. Тираж 100 экз. Заказ Г35.

---

Издательство КНИТУ-КАИ  
420111, г.Казань, К.Маркса,10