

**ОТЗЫВ  
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
Смирнова Владимира Александровича

на диссертационную работу Лучкиной Татьяны Александровны  
**«АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ, ПОСТРОЕННОЙ НА  
ГРУБЫХ ДАТЧИКАХ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы  
(в приборостроении)

*На отзыв представлена диссертационная работа и автореферат. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы из 159 источников, и изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 22 рисунка и 4 таблицы.*

### **1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Тема диссертации связана с разработкой алгоритмов автономной информационно-измерительной системы определения угловой ориентации, построенной на грубых датчиках.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят все более широкое применение. Практически любому беспилотному летательному аппарату необходима информация об угловом положении относительно местной географической системы координат. В большинстве современных летательных аппаратов угловое положение определяется триадой гироскопических датчиков угловой скорости, что обусловлено их высокой помехозащищенностью и надежностью. Существенным недостатком инерциальных систем определения угловой ориентации является быстрое нарастание ошибок с течением времени. Данная проблема особенно актуальна при использовании недорогих и малогабаритных грубых датчиков. Для устранения указанного недостатка широко применяется комплексирование инерциальных датчиков со спутниковыми навигационными системами, чему посвящено значительное число работ. Однако возможны ситуации, когда использование спутниковых навигационных систем оказывается невозможным. В этом случае для комплексирования с инерциальной системой используются автономные датчики, основанные на измерении внешних параметров среды – магнитометры, датчики воздушной скорости, доплеровские датчики скорости, радиовысотомеры, и др. Публикаций, посвященных комплексированию инерциальных датчиков и автономных датчиков, значительно меньше, чем по комплексированию со спутниковыми навигационными системами.

Таким образом, разработка систем определения угловой ориентации по совместным измерениям инерциальных и автономных датчиков и алгоритмов их комплексирования является актуальной научной задачей.

## **2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве основной цели диссертации автор ставит повышение точности автономной информационно-измерительной системы определения угловой ориентации подвижного объекта, построенной на грубых датчиках, путем применения новых алгоритмов использования информации с дополнительных датчиков – магнитометров и датчиков воздушных сигналов; разработки алгоритмов оценки инструментальных погрешностей датчиков и их вариаций в режиме движения объекта; применения новых алгоритмов комплексирования информации с инерциальных датчиков и с дополнительных датчиков.

Во введении автором обоснована актуальность темы, показаны объект и предмет исследования, сформулирована цель работы, сформулирована научная проблема исследования и показаны возможные направления ее решения. Формулируются основные положения диссертации – научная новизна, практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту, сведения о внедрении результатов работы.

В первом разделе автором рассматривается классификация, состав и особенности функционирования информационно-измерительных систем, обеспечивающих автономную оценку углов ориентации. Рассматривается классический подход к решению задачи оценки угловой ориентации подвижного объекта в бесплатформенных системах ориентации. На основе анализа существующих подходов к определению углов ориентации проведена постановка научных задач, которые необходимо решить для достижения цели диссертационной работы.

В втором разделе соискателем проведен анализ базовых алгоритмов оценки углов ориентации по показаниям инерциальных датчиков. Рассмотрена задача определения углов Эйлера-Крылова интегрированием сигналов датчиков угловых скоростей и задача определения углов крена и тангажа по сигналам акселерометров, измеряющих ускорение силы тяжести. Получены формулы для оценок методических погрешностей, обусловленных отсутствием в базовых алгоритмах учета переносной угловой скорости (при оценке углов ориентации интегрированием сигналов с датчиков угловой скорости) и линейного ускорения подвижного объекта (при оценке углов крена и тангажа путем измерения проекций ускорения силы тяжести акселерометрами). Предложены алгоритмы оценки проекций вектора абсолютного линейного ускорения и вектора переносной угловой скорости с использованием сигналов триады магнитометров и датчиков воздушных сигналов.

В третьем разделе решаются задачи повышения точности автономной информационно-измерительной системы определения угловой ориентации. Рассматриваются алгоритмы стендовой оценки температурной составляющей аддитивной погрешности датчиков угловых скоростей. Соискателем предложена методика полиномиальной аппроксимации указанной погрешности при стендовой калибровке датчиков. Предложен способ оценки аддитивной систематической погрешности и фильтрации аддитивной случайной погрешности датчиков угловой скорости в процессе функционирования системы на основе Калмановской фильтрации. Предложен алгоритм стендовой оценки систематической аддитивной и

мультиплексивной составляющей погрешности магнитометров и акселерометров на фоне случайной составляющей погрешности типа "белый шум". Разработан алгоритм оценки смещения нуля магнитометров в процессе функционирования системы. В завершающей части третьей главы соискателем предложены алгоритмы оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей и по сигналам акселерометров с компенсацией рассмотренных во второй главе методических погрешностей при помощи данных с дополнительных источников навигационной информации – датчиков воздушных сигналов и триады магнитометров. Также предложен способ комплексирования оценок углов ориентации по сигналам датчиков угловых скоростей и акселерометров.

В четвертой главе проведено математическое моделирование работы предложенных алгоритмов определения угловой ориентации. Приведены результаты численного моделирования погрешностей датчиков угловых скоростей, и акселерометров. С учетом приведенных характеристик чувствительных элементов проведено моделирование работы базовых алгоритмов определения углов ориентации и алгоритмов, предложенных соискателем. Показано, что предложенные алгоритмы позволяют обеспечить погрешность определения угловой ориентации подвижного объекта на уровне хороших зарубежных систем (около 6 угловых минут по крену и азимуту).

В заключении приведены основные результаты работы, выносимые автором на защиту.

### **3. СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ, РЕКОМЕНДАЦИЙ И ЗАКЛЮЧЕНИЙ**

Работоспособность и преимущества предлагаемых новых алгоритмов для оценки углов ориентации автор строго доказывает методами математического анализа и дополнительно подтверждает численным моделированием в системе MatLab. Способ аппроксимации температурных погрешностей датчиков угловых скоростей также проверен экспериментально.

Для решения поставленных задач использовались методы теории инерциальной навигации, методы кинематики твердого тела, теории измерений, теории оценивания, теории оптимальной фильтрации. Для подтверждения результатов также использовались методы имитационного моделирования, проводились экспериментальные исследования.

Результаты исследования показали отсутствие противоречий с аналогичными результатами, полученными другими исследователями.

Проведенный анализ диссертации позволяет сделать вывод о достаточно полной обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Выводы и результаты численного моделирования не противоречат известным теоретическим моделям.

Содержание автореферата полностью отражает основные идеи, методы и результаты, полученные в диссертации.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы прошли апробацию путем публикации в рецензируемых научных журналах,

входящих в перечень ВАК, и обсуждения их на всероссийских и международных научно-технических конференциях. Автором достаточно полно проработаны научные аспекты исследования, а сделанные выводы обоснованы и в достаточной мере аргументированы.

#### **4. ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

1. предложенными способами оценки инструментальных погрешностей датчиков угловой скорости, акселерометров и магнитометров при стеновой калибровке;

2. разработанными алгоритмами оценки инструментальных погрешностей датчиков угловой скорости в процессе движения подвижного объекта на основе фильтра Калмана с учетом динамики подвижного объекта, "белого" и "цветного" шума датчиков;

3. предложенными алгоритмами оценки проекций векторов абсолютного линейного ускорения и абсолютной угловой скорости с использованием датчиков воздушных сигналов и магнитометров;

4. способами оценки углов ориентации по сигналам акселерометров с компенсацией методических погрешностей, обусловленных ускорениями подвижного объекта и по сигналам датчиков угловой скорости с компенсацией методических погрешностей, обусловленных переносной угловой скоростью.

5. алгоритмами комплексирования оценок углов ориентации, полученными по сигналам с датчиков угловой скорости и с акселерометрами.

Практическая и теоретическая значимость научных результатов подтверждена документами о внедрении:

1. Результаты диссертационной работы в виде программно-алгоритмического обеспечения внедрены в производство на АО НПО "ОКБ им. М.П. Симонова" (г. Казань).

2. Результаты работы внедрены в учебный процесс Казанского национального исследовательского университета им. А.Н. Туполева по направлениям подготовки 24.03.02 "Системы управления движением и навигация" и 27.03.04, 27.04.04 "Управление в технических системах" по профилю подготовки "Управление подвижными объектами".

#### **5. ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

В качестве замечаний считаю необходимым и целесообразным отметить следующее:

1. В тексте диссертации сказано, что традиционные алгоритмы определения параметров ориентации не учитывают вращение Земли и облет Земли, однако это не так. Также не приводятся численные оценки погрешности, обусловленной отсутствием учета вращения Земли и облета Земли.

2. Диссертация посвящена построению информационно-измерительной системы на грубых датчиках, однако в разделе 3.1.1 рассматривается волоконно-

оптический датчик угловой скорости ВГ941-3Б, который относится к датчикам средней точности.

3. Матрица поворотов (2.2) на стр.38 не соответствует системе уравнений (2.1) для которой она, по видимому, записана.

4. В библиографическом списке диссертации одна из публикаций соискателя указана два раза (под номерами 79 и 83), при этом в библиографическом списке автореферата данной публикации нет.

5. В работе имеются некорректные формулировки. Например, на стр.27: «...инерциальные датчики... измеряющие ускорение и вращение той системы координат (базовой), в которой они установлены.». В соответствии с ГОСТ 20058-80 есть термин «связанная система координат», и именно в ней измеряются скорости и ускорения инерциальными датчиками бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Термина «базовая система координат» в ГОСТе нет. К тому же в диссертации не поясняется, что подразумевается под базовой системой координат. На стр.19 вводится понятие не базовой а опорной системы координат. Там же, на стр.27 сказано: «...измерители (датчики) угловой скорости определяют величину угловой скорости вращения базовой системы координат, либо величину интеграла от абсолютной угловой скорости, имеющего размерность угла поворота...». Следует заметить, что гирокомпенсаторный датчик, измеряющий угол поворота относительно первоначального положения не может быть назван датчиком угловой скорости.

6. Поскольку в работе используется значительное число сокращений, в начале диссертации стоило бы привести их перечень с расшифровкой.

7. При рассмотрении задачи определения барометрической высоты не поясняется влияние изменения погодных условий (атмосферного давления) на погрешность измерений..

8. В работе нет численных оценок компенсируемых погрешностей и требуемого времени работы навигационной системы в автономном режиме. Следовало бы привести численные оценки исследуемых во второй главе погрешностей в конце главы.

9. Не совсем понятно, чем обусловлено пренебрежение погрешностью коэффициентов передачи датчиков угловых скоростей и погрешностью их неортогональности (стр.59). Как показывает опыт, эти погрешности оказывают существенное влияние на точность определения углов ориентации и калибровать их сложнее, чем смещение нуля.

10. Замеченные опечатки: стр.6, стр.7, стр.18, стр.19, стр.38, стр.42, стр.46, стр.59, и.т.д.

Отмеченные замечания носят частный и рекомендательный характер и не снижают положительной оценки и общей ценности диссертационной работы.

## 6. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Лучкиной Татьяны Александровны «Алгоритмы автономной информационно-измерительной системы определения угловой ориентации, построенной на грубых датчиках» является законченной научно-

квалификационной работой, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, свидетельствующие о личном вкладе автора в науку.

По теме, содержанию и полученным результатам и выводам, диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в приборостроении).

Полученные в работе теоретические и практические результаты будут способствовать решению задач повышения точности автономных информационно-измерительных систем определения угловой ориентации подвижных объектов, развитию теории комплексирования инерциальных датчиков с магнитометрическими и датчиками воздушных сигналов.

Оценивая результаты соискателя в целом, считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Лучкина Татьяна Александровна, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук.

Смирнов Владимир Александрович,  
официальный оппонент,  
доцент кафедры «Приборы и биотехнические  
системы» ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
кандидат технических наук, доцент;  
шифр специальности, по которой  
защищена диссертация: 20.02. 14

«15» мая 2019 г.

300012, г. Тула, проспект им. Ленина, д. 92  
Телефон: (4872) 35-05-52, (906) 536-10-64  
E-mail: veld071@rambler.ru

