

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора

Харина Евгения Григорьевича

на диссертационную работу Кальченко Артема Олеговича на тему:

«Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы в полете при помощи информации от спутниковой навигационной системы»»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Бескарданые (бесплатформенные) инерциальные навигационные системы (БИНС) входят в состав пилотажно – навигационного оборудования большинства летательных аппаратов (ЛА) гражданской и военной авиации. От точности и надежности их работы зависит решение задач общего и специального самолетовождения, боевых задач ЛА ВКС. Эти системы являются автономными, погрешности их в определении координат имеют нарастающий с течением времени колебательный (с периодом Шулера – 84,4 мин) характер. В навигационных комплексах проводится комплексная обработка информации (КОИ) БИНС и корректоров – систем дальней и ближней навигации, спутниковых навигационных систем (СНС) и др. КОИ проводится с целью обеспечения высокоточной информации, в том числе при пропадании информации от корректоров.

Калибровка БИНС на стендах является необходимым этапом подготовки системы к эксплуатации. В процессе стендовой калибровки системы определяются параметры инструментальных погрешностей инерциальных датчиков с целью последующей компенсации в режимах выставки и навигации. Оценка и коррекция погрешностей БИНС в полете позволяют повысить точность и надежность информации.

В связи с изложенным разработка методов и алгоритмов калибровки БИНС на стенде и в полете является *актуальной задачей, имеющей большое научное и практическое значение*. Разработка методов и алгоритмов калибровки БИНС, проведение их исследования и отработки для практического внедрения являются *целью диссертации*. Для достижения этой цели автор провел исследования по совмещению информации БИНС и СНС, разработал методы определения тех параметров погрешностей БИНС, которые меняются от запуска к запуску, исследовал дополнительные возможности, которые предоставляет СНС с несколькими разнесенными антеннами. На основе этих исследований были разработаны алгоритмы калибровки БИНС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в оригинальной постановке задачи калибровки БИНС в виде процедур калибровки:

- ✓ на стенде, для компенсации погрешностей гироскопов и акселерометров;
- ✓ на стоянке и пробеге перед полетом для компенсации разброса инструментальных погрешностей БИНС в конкретном запуске;
- ✓ оценка с компенсацией в полете путем комплексной обработки информации БИНС и СНС.

В диссертации рассматриваются две последние процедуры. Исследования базируются на методах теоретической механики, теории инерциальной навигации, теории оптимального оценивания, линейной алгебры, теории случайных процессов. Применяются методы, математического и полунатурного моделирования, объединяющие результат калибровки БИНС на первом этапе.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные алгоритмы могут быть использованы на предприятиях - разработчиках БИНС и на предприятиях, занимающихся летными испытаниями ПНО на летательных аппаратах ГА и МО.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации 105 страниц текста с 21 рисунком и 20 таблицами. Список литературы содержит 37 наименований.

Во *введении* автор выполнил обзор состояния вопроса калибровки БИНС и обосновал актуальность решаемой проблемы – создания алгоритмов поэтапной калибровки БИНС для повышения точности выходных параметров.

В *первой главе* дана постановка задачи калибровки и коррекции БИНС, излагаются основы информационного подхода для решения этой задачи, описываются все составляющие математической модели калибровки и коррекции БИНС в полете, приведены уравнения ошибок БИНС, модели инструментальных погрешностей БИНС, модели корректирующих измерений. Поставлена задача оценки вектора состояния погрешностей БИНС, в том числе инструментальных погрешностей в его составе, с целью их компенсации. Уравнения модели БИНС даны в проекциях на оси трехгранника виртуальной гиropлатформы. Следует отметить аккуратность в преобразованиях применяемых систем координат.

Во *второй главе* автор рассматривает проблемы калибровки БИНС в полете, определяя при этом оптимальные траектории полета, на которых наблюдаемость ошибок БИНС будет наилучшей. Траектория построена по аналогии с траекторией на стенде, которая обеспечила калибровку БИНС. Эта траектория обладает свойствами трех циклов калибровки на стенде с горизонтальной осью вращения и легко реализуема в полете.

Для решения задачи калибровки в полете предлагается использовать специальные движения двух типов: эволюции, практически не нарушающие крейсерский режим самолета, и координированную змейку.

Результаты ковариационного анализа показали приемлемую точность оценки параметров инструментальных погрешностей и значительное уменьшение ошибок автономной навигации.

Необходимо отметить, что рекомендации по выбору траекторий полета для улучшения наблюдаемости целесообразно использовать при проведении летных испытаний БИНС.

Проблема коррекции погрешностей БИНС решается как в полете, так и после полета на земле с помощью программных комплексов комплексной обработки информации БИНС и СНС на основе фильтра Калмана. В решении этой задачи автор рассматривает совмещение информации от СНС, которая привязана к месту установки антенны, и от БИНС, которая установлена в центре масс самолета. Кроме того, автор уделяет большое внимание процедуре синхронизации информации от обеих систем. Эти вопросы освещены в *главе три*.

В *главе четыре* автор показал методом математического моделирования и ковариационного анализа, что на этапе руления и разбега при калибровке БИНС оцениваются нули акселерометров с разумной точностью, а также погрешности выставки системы в азимуте и по вертикали, но при этом не оцениваются нули датчиков угловой скорости. Компенсация оценок, полученных на начальном участке, далее при автономной навигации позволяет повысить ее точность.

В *главе пять* рассмотрен вопрос использования разнесенных антенн спутниковой навигационной системы. Измерения от разнесенных антенн являются дополнительной информацией для решения задачи калибровки БИНС. Анализ целесообразности использования нескольких разнесенных антенн СНС показано, что привлечение информации от второй антенны СНС не дает значительного улучшения точности автономной навигации БИНС высокого класса точности.

В *главе шесть* для проверки работы алгоритма калибровки с использованием реальных данных был поставлен эксперимент на трехосном стенде с установленной на нем БИНС авиационного применения. Поскольку в предыдущих разделах диссертации автор показал, что основную роль для

повышения точности оценивания параметров инструментальных погрешностей БИНС играют изменения углов ориентации ЛА во время полета, а не движение центра масс, на стенде были воспроизведены именно такие режимы. Были проимитированы колебания по крену и тангажу и „змейка”.

Результаты обработки реальных данных стендовых экспериментов показали работоспособность разработанного алгоритма калибровки БИНС в полете. Кроме того, были подтверждены результаты ковариационного анализа о том, что выбранная траектория обеспечивает хорошую меру оцениваемости инструментальных погрешностей, а алгоритм калибровки способствует повышению точности автономной навигации БИНС.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно констатировать, что на основе проведенных исследований автором выработаны научно обоснованные технические решения и разработаны:

- ✓ поэтапная калибровка БИНС, заключающаяся в оценке и компенсации инструментальных погрешностей – дрейфов гироскопов и погрешностей акселерометров;
- ✓ алгоритм коррекции погрешностей БИНС в полете, базирующийся на комплексной обработке информации от БИНС и СНС с использованием фильтра Калмана.

Разработанные алгоритмы и рекомендации могут использоваться как при создании, так и при летных испытаниях БИНС.

Основные результаты работы докладывались на научно - технических семинарах и конференциях, в том числе международных. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат отражает основные положения диссертации.

К недостаткам работы можно отнести:

- ✓ наличие общей структурной схемы калибровки и коррекции БИНС позволило бы более четко сформулировать постановку задачи;

- ✓ отсутствие описания алгоритма коррекции в целом, хотя бы в виде структурной схемы, затрудняет понимание решения задачи коррекции БИНС в полете;
- ✓ в диссертационной работе не приведены материалы летных испытаний БИНС, которые могли бы быть хорошим подтверждением эффективности разработанных алгоритмов;
- ✓ применение для анализа результатов моделирования в основном метода ковариационного анализа недостаточно; следовало бы анализировать реализации оценок погрешностей БИНС.

Приведенные недостатки не снижают значения представленной работы. Диссертационная работа по актуальности, степени обоснованности научных выводов, их новизне и достоверности, практической значимости является законченной научной работой, в которой решена научная и практическая задача калибровки БИНС с целью повышения ее точности.

Диссертационная работа отвечает действующим требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кальченко А.О., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Официальный оппонент —

начальник отделения 9 НИЦ ОАО «ЛИИ им. М. М. Громова»,

доктор технических наук, профессор

Е. Г. Харин

тел: 8(495) 556-56-43

e-mail: nio9@lii.ru

Е. Г. Харин
26.08.16

Подпись Е. Г. Харина удостоверяю

Первый заместитель Генерального директора по науке — начальник НИЦ «ОАО «ЛИИ им. М.М. Громова», кандидат технических наук

В.В. Цыплаков



В.В. Цыплаков
30.08.16