

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Тарыгина Ильи Евгеньевича
на тему: «РАСШИРЕННЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ МОДЕЛИ
ИЗМЕРЕНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В ЗАДАЧЕ
КАЛИБРОВКИ»

по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Структура и объем диссертации. Представленная на оппонирование диссертационная работа состоит из введения, списка обозначений, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 источников и Приложения общим объемом 151 страница, и включает в себя 45 рисунков и 13 таблиц. Во **введении** дан обзор литературы по теме диссертации, обоснована актуальность решаемой проблемы, ставятся задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, и изложено ее краткое содержание.

В **первой** главе рассматриваются традиционные модели погрешностей измерений инерциальных датчиков и их модификации, учитывающие зависимости от температуры, производной температуры по времени (скорости изменения температуры) и компонент пространственного градиента температуры. Формулируется математическая постановка задачи калибровки в виде задачи оценивания вектора состояния линейной динамической системы на основе вектора измерений, линейно связанного с вектором состояния. Исследуется наблюдаемость параметров расширенной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков аналитически и при помощи ковариационного моделирования, а также формулируются необходимые и достаточные условия наблюдаемости коэффициентов зависимостей от температуры, производной температуры по времени и компонент пространственного градиента температуры.

Во **второй** главе рассматривается задача оценивания производной температуры по времени внутри БИНС по измерениям датчика температуры в случае, когда стандартное численное дифференцирование неприменимо, поскольку шаг дискретизации показаний термодатчиков на порядки больше характерного изменения температуры за такт съема. Как следствие, ошибка измерений принципиально отличается от модели белого шума. Предлагается и обосновывается алгоритм оценивания, являющийся модификацией фильтра Калмана. Формирующее уравнение для фильтра получено на основе качественного анализа решения начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности. Приводятся результаты оценки производной температуры в реальном времени для БИНС-РТ в серии экспериментов.

В **третьей** главе представлены примеры температурной калибровки для системы навигационного класса точности БИНС-РТ и микромеханической курсовертикали БЧЭММ-1. Приводятся оценки температурных коэффициентов и соответствующих СКО, выполнена компенсация погрешностей и сравнение точности БИНС в режиме автономной навигации до и после калибровки.

В **четвертой** главе проанализирована задача температурной калибровки блока ДУС без ньютонометров с использованием измерений углов поворота осей двухосного калибровочного стенда.

В **заключении** к диссертации приводятся основные выводы и результаты работы.

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), являющихся информационной основой подавляющего большинства современных бортовых навигационных комплексов подвижных объектов различного назначения. Точность навигационного решения БИНС во многом определяется инструментальными погрешностями входящих в нее инерциальных датчиков, погрешности которых включают в себя

погрешности совокупность различных компонент - смещения нулевых сигналов, ошибки масштабных коэффициентов, углы перекосов осей чувствительности и другие. При этом задача калибровки состоит в оценке параметров априорной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков по результатам калибровочных экспериментов, проходящих на специализированном оборудовании. Решение задачи калибровки позволяет компенсировать погрешности измерений инерциальных датчиков при функционировании системы. Поскольку инструментальные погрешности подвержены влиянию температуры, а БИНС во время эксплуатации испытывает широкодиапазонную температурную нагрузку, возникает задача учета температурных зависимостей погрешностей измерений инерциальных датчиков во время калибровки. В настоящее время калибровке БИНС с учетом температурных зависимостей уделяется большое внимание, поскольку такая калибровка позволяет повысить точность системы благодаря решению чисто математической задачи без необходимости решения сложной технологической задачи по повышению точности систем или к использованию дополнительного оборудования для термостатирования системы). Учитывая это, следует заключить, что разработка методов калибровки БИНС с учетом температурных зависимостей, предлагаемых в диссертационной работе является актуальной проблемой прикладной механики.

Достоверность и степень обоснованности научных положений и полученных результатов определяется использованием классических методов теоретической механики, линейной алгебры, теории случайных процессов, оптимального оценивания и математической физики. Полученные в работе алгоритмы проверены путем математического моделирования, а также и при обработке реальных данных, полученных экспериментально с использованием систем различного класса точности.

Научная новизна. К основным полученным в диссертационном исследовании новым научным результатам можно отнести:

- разработанную и исследованную методику температурной калибровки датчиков БИНС, обеспечивающую оценку коэффициентов влияния температуры на показания инерциальных датчиков;
- аналитическое и численное исследование наблюдаемости коэффициентов температурного влияния и сформулированные необходимые и достаточные условия наблюдаемости вектора в задаче оценивания погрешностей датчиков;
- сформулированную задачу оценивания скорости изменения температуры в реальном времени по измерениям датчиков температуры с большим шагом квантования и предложенный алгоритм оценивания, в виде модифицированного классического фильтра Калмана;
- решение задачи температурной калибровки блока ДУС без использования ньютонометров по измерениям датчиков точного калибровочного стенда, с учетом возможного временного рассогласования показаний датчиков БИНС и стенда.

Публикации по теме диссертации и апробации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах (индексируемых в международных базах **WebOfScience**, **Scopus** и **RSCI**) и 7 публикаций в прочих изданиях, сделано 4 доклада на международных конференциях.

Работа представляется целостным научным исследованием, на актуальную тематику, которая ясно изложена и хорошо структурирована. Тем не менее по работе можно сделать **следующие замечания:**

1. В гл.1 указывается, что наблюдаемость определяется методом ковариационного анализа ошибок оценивания. Такое исследование позволяет получить только представление об оцениваемости переменных в условиях проводимого сценария моделирования. При этом может не быть полной наблюдаемости, а присутствует совместная наблюдаемость отдельных компонент вектора состояния в линейных комбинациях.

2. Как понимать вывод по результатам моделирования в разделе 1.2.5: «...для обеспечения оценок СКО в конечный момент времени смещений нулевых сигналов ДУС на уровне 0.01 град/ч, СКО шумов ДУС и ньютометров должны соответствовать $\sigma_v = 0.0001$ [град/ч] и $\sigma_f = 0.1$ [мм/сек²]». Это следует рассматривать как требования к шумам датчиков при калибровке для получения указанного уровня ошибок постоянного дрейфа? Другими словами, если СКО шумов ДУС выше указанного (а указано очень высокое требование), то желаемый уровень в 0,01 град/ч не достигим

3. В разделе 3.1.2 указывается: «Моделирование, проведенное в предыдущей главе, а также практический опыт показывают, что в таком эксперименте линейная динамическая система является наблюдаемой, и все компоненты вектора состояния оцениваются с приемлемой точностью». Вновь, аналогично замечанию 1, факт полной наблюдаемости тут не доказан, но, тем не менее, в условиях конкретного эксперимента достигнута оцениваемость интересующих компонент.

4. В главе 4 моделирование калибровки ДУС ведется исключительно на уровне ковариационных матриц ошибок оценивания без анализа самих оценок калибруемых параметров, что, с одной стороны, даёт обобщенную оценку достижимого уровня точности оценивания параметров, но, с другой стороны не позволяет убедиться в устойчивости оценивания.

5. В п.4.1 вводится понятие систематического малого запаздывания τ , с которым поступают измерения сенда. Насколько оправдано такое допущение о постоянстве этого параметра, и не стоило ли для решения этой проблемы перейти к системе реального времени при проведении калибровки, используя при этом в качестве единой шкалы времени соответствующие возможности ГНСС?

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Тарыгин Илья Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, доцент,
начальник научно-исследовательского отделения института №3,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)

Веремеенко Константин Константинович,

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.11.03 – Приборы навигации

Адрес места работы:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», Институт №3,
Тел.: +7(499)-158-1202; e-mail: mai@mai.ru