

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Богданова Олега Николаевича

«Методика согласованного моделирования измерений инерциальных датчиков, траекторных параметров объекта с приложением к задачам инерциальной и спутниковой навигации», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика

Диссертационная работа Богданова О.Н. посвящена разработке универсального комплекса алгоритмов моделирования различных прикладных задач из области инерциальной и спутниковой навигации. Результатом работы является методика моделирования, предназначенная для изготовителей и потребителей инерциальных навигационных систем и спутниковой навигационной аппаратуры. Блок алгоритмов моделирования задач инерциальной навигации охватывает все этапы функционирования бескарданных навигационных систем (БИНС) и предназначается для исследования широкого круга задач. Здесь основное внимание уделено вопросу моделирования измерений инерциальных датчиков (гироскопов и ньютонометров) БИНС. Раздел, посвященный моделированию в спутниковой навигации, содержит решение двух задач, предназначенных для имитации первичных измерений спутникового приемника. Первая задача – высокоточное определение траектории навигационного спутника, с использованием данных сервиса IGS. Вторая задача – моделирование ионосферной задержки кодовых и фазовых спутниковых измерений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения и заключения. Во введении определяется основная цель работы, приводится содержание работы и обзор основных публикаций.

Первая глава является вводной, реферативно описывает основные используемые понятия и соотношения. Также в первой главе рассмотрен вопрос взаимно согласованного моделирования траекторных параметров движения объекта. Входные параметры могут либо задаваться аналитическими функциями, либо представлять собой дискретный набор экспериментальных данных.

Вторая глава посвящена вопросам моделирования основных этапов работы БИНС. Центральным разделом главы является задача имитации показаний идеальных инерциальных датчиков: гироскопов и ньютонометров. Исходными данными являются координаты и углы ориентации объекта. В диссертации рассмотрены два подхода. Первый подход базируется на частных случаях интегрируемости кинематических и динамических уравнений навигации и предназначается для исследования влияния инструментальных

погрешностей датчиков и ошибок начальной выставки на точность навигационного решения. Второй подход представляет собой точное вычисление показаний интегрирующих инерциальных датчиков и предназначается для исследования многошаговых методов интегрирования уравнений навигации. В случае дискретной входной информации применяется аппарат сглаживания кубическими сплайнами, позволяющий получить координаты и углы ориентации как функции времени, непрерывные вместе со своими первыми и вторыми производными. Неотъемлемым свойством всех алгоритмов является выполнение нулевого теста: решение навигационной задачи с точностью воспроизводит траекторию, которая поступила на вход. Далее рассматривается ряд частных задач, актуальных для навигационных приложений.

Следующий раздел посвящен вопросу тестирования уравнений ошибок, используемых на практике. В работе представлена методика тестирования, позволяющая определять, насколько та или иная модель ошибок корректна для задач комплексирования БИНС с известными характеристиками инерциальных датчиков.

Раздел, посвященный вопросу калибровки БИНС, содержит исследование задачи моделирования для калибровки на грубом стенде, задающем одну ось вращения. Рассматриваются как общий случай с произвольным набором циклов вращения стенда и с произвольным расположением БИНС на стенде, так и частный случай, когда ось вращения горизонтальна, а калибровка состоит из трех циклов, в каждом из которых одна из осей чувствительности датчиков совмещается с осью вращения стенда. В представленных алгоритмах имитации учитываются угловые ошибки установки БИНС на стенде, а также детально учитывается внутренняя геометрия блока чувствительных элементов.

Раздел, посвященный исследованию влияния вибрации на точность начальной выставки, содержит методику, предназначенную для сравнительного анализа многошаговых численных методов определения ориентации объекта. В работе приведена типовая модель вибрации, получены выражения, моделирующие измерения гироскопов. Представлен удобный и наглядный способ качественного сравнения многошаговых методов для различных частот вибрации и различных частот съема показаний гироскопов.

Третья глава посвящена двум задачам моделирования в спутниковой навигации. Задача высокоточного определения траектории навигационного спутника решается с привлечением позиционных данных международного центра IGS, которые представляют собой достаточно редкую дискретную информацию о координатах спутников. В работе представлен алгоритм вычисления координат спутника в произвольный момент времени на уровне точности данных IGS с использованием только данных IGS. Отдельно

рассмотрен вопрос оценки с высокой точностью внешних возмущений, действующих на спутник.

Рассмотрена задача моделирования ионосферной погрешности спутниковых измерений. Описаны два распространенных подхода к вычислению оценки ионосферной погрешности и предложен комбинированный алгоритм, сочетающий в себе достоинства обоих подходов.

В приложении содержатся стандартные алгоритмы позиционирования спутников систем GPS и ГЛОНАСС, рекомендованные в соответствующих интерфейсных документах.

Актуальность темы. Современное развитие инструментальной базы как грубых, так и точных инерциальных и спутниковых навигационных систем позволяет находить для них все новые применения. При этом этап математического моделирования является одним из наиболее важных, позволяющих правильно выбрать конфигурацию новой системы исходя из решаемых ею задач. Поэтому тема, связанная с разработкой унифицированных алгоритмов моделирования навигационных систем различного класса точности в различных условиях является весьма актуальной.

Научная новизна. Разработаны алгоритмы согласованного моделирования показаний инерциальных датчиков, позволяющие исследовать различные задачи инерциально-спутниковой навигации, в частности, выполнять сравнительный анализ различных численных методов реализации навигационных алгоритмов. Получены оригинальные алгоритмы восстановления траекторий навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС. Предложен вариант моделирования ионосферной задержки.

Обоснованность научных положений. Работа содержит полное и ясно изложенное обоснование всех полученных результатов, сделанных выводов и заключений, с достоверными ссылками на литературу, приведены необходимые для проверки выкладки и доказательства. Все полученные автором алгоритмы испробованы на модельных и экспериментальных данных, продемонстрирована эффективность использованного подхода.

Практическая значимость работы не вызывает сомнений. Результаты, полученные в диссертации, могут напрямую использоваться при разработке и отладке как самих

бесплатформенных инерциальных и спутниковых навигационных систем, так и алгоритмов, в них реализуемых.

Диссертацию Богданова О.Н. выгодно отличает сочетание хороших научных результатов, корректного применения формальных методов, строгих математических построений с практической и методологической направленностью работы. Положительной особенностью является также то, что все полученные результаты снабжены содержательными примерами обработки данных, подтверждающих справедливость полученных выводов и иллюстрирующих работоспособность приведенных алгоритмов. Необходимо также отметить завершенность, полноту и практическую направленность представленных в диссертации исследований, логичность построения и четкость изложения материала. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата полностью отражает основные результаты работы.

По теме диссертации соискателем опубликовано одиннадцать работ, в том числе две работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК для представления работ по данному научному направлению.

Замечания по диссертации. По работе могут быть высказаны следующие замечания:

1. Статья [34], на которую автор ссылается на стр. 10, как на один из фундаментальных трудов по теории инерциальной навигации, вряд ли может быть отнесена к таковым. Там была затронута тема согласованного моделирования показаний инерциальных датчиков, поэтому, скорее всего, ссылка должна была появиться в следующем абзаце.
2. Список публикаций автора, согласно автореферату, насчитывает одиннадцать работ, однако в тексте диссертации на стр. 18 перечислены только десять.
3. На стр. 43 появляются никак не прокомментированные обозначения N и K . Судя по всему, по ошибке, вместо величин l и p .
4. На стр. 51 и 54 доказывается существование обратных матриц для матриц C_2 и C_3 при малых значениях угла γ . Однако на стр. 51 утверждение некорректно сформулировано. Можно прийти к выводу, что из невырожденности матрицы при малых γ следует невырожденность при любых γ .
5. На стр. 67 в формуле (136) последовательность поворотов задана неправильно, если целью ставилось выполнение (137). По крайней мере, если взять точку K с

координатами $(r, 0, 0)$, для которой широта и долгота равны нулю, после поворотов по схеме (136) координаты полюса в новой системе координат станут равны $(-r, 0, 0)$, и соотношения (137) и, как следствие, (139) будут не выполнены.

6. На стр. 83 в соотношении (183) использовано неудачное обозначение для скалярного значения угловой скорости вращения стенда, можно перепутать с вектором, а в (184) пропущена степень 2 у множителя ω .
7. На стр. 122 неоднозначно определена замена (271) — не указано, координаты какого из полюсов используются.

Заключение. Указанные замечания отнюдь не снижают достоинств диссертационной работы, которая представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, обладающее научной новизной и практической значимостью. Считаю, что диссертация Богданова О.Н. «Методика согласованного моделирования измерений инерциальных датчиков, траекторных параметров объекта с приложением к задачам инерциальной и спутниковой навигации» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и соответствует профилю специальности 01.02.01 — «Теоретическая механика», а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент

Е.В. Каршаков

Каршаков Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук,
Старший научный сотрудник Лаборатории №1 «Динамических информационно-
управляющих систем» Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. +7 495 334 90 80,
эл. адрес: karshak@mail.ru

27.07.2015

