

УДК 629.05:517.93;531.39/.768/.77

КАЛИБРОВКА В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

А.А. Голован

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: aagolovan@yandex.ru

Н.А. Парусников

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: aagolovan@yandex.ru

Н.Б. Вавилова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: nb-vavilova@yandex.ru

А.В. Козлов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: a.kozlov@navlab.ru

И.А. Папуша

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1
E-mail: ipapusha@yandex.ru

Ключевые слова: бескарданная инерциальная навигационная система, калибровка, испытательный стенд, инструментальные погрешности, фильтр Калмана.

Аннотация: Доклад содержит обзор методики калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС) на поворотных стендах, разработанной в лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова. Предложенная методика находит свое применение в реальных разработках. Основным источником информации для калибровки служат показания самих инерциальных датчиков. Опорным планом угловых движений платформы стенда служат три цикла вращений вокруг горизонтальной оси, в каждом из которых одна из трех приборных осей БИНС совмещается с осью вращения. Главными достоинствами метода являются: возможность калибровки БИНС на грубых одноосных стендах; отсутствие жестких требований к плану операций, их последовательности и параметрам движения; применение единого алгоритма обработки калмановского типа.

1. Введение

Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем до ввода их в эксплуатацию — необходимый этап реализации метода инерциальной навигации. Калибровка осуществляется на поворотных стендах. Любой метод калибровки, прежде всего,

предполагает введение математической модели инструментальных погрешностей для датчиков первичной информации — инерциальных датчиков: датчиков удельной силы (ньютонметров или акселерометров) и датчиков угловой скорости (ДУС), и предполагает параметризацию такой модели. Калибровка состоит в определении (оценивании) параметров модели с целью компенсации инструментальных погрешностей в режиме навигации.

В России и в мире существует достаточно много компаний, занимающихся производством инерциальных датчиков и систем различного типа и класса точности: микроэлектромеханических датчиков (МЭМС), лазерных, волоконно-оптических ДУС, волновых твердотельных гироскопов. Среди российских организаций можно выделить ЦНИИ «Электроприбор», ОАО НПП «Темп-Авиа», НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова, НИИФИ, ГНЦ НПК «Технологический центр» МИЭТ, ПАО МИЭА, АО ПНППК, ФГУП «ГосНИИАС», ООО «НПК «Электрооптика», ООО НПК «Оптолинк», ООО «ТеКнол», АО «РПКБ», АО «ИТТ», АО «РПЗ» и другие. Из зарубежных производителей это фирмы Northrop Grumman, Honeywell, Safran Electronics & Defense, Motorola, Analog Devices, BAE Systems, Rockwell International, Draper Laboratory. Соответственно, в этих организациях решаются и задачи калибровки. Среди академических организаций задачами калибровки занимаются в ИТМО, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМ АН РФ, МАИ, МГУ им. М.В. Ломоносова и др.

Методы стендовой калибровки разнообразны (см., например, [1,2,12–16]). Традиционно на большинстве предприятий используют высокоточные стенды. Калибровка, как правило, состоит в некоторой последовательности статических положений и поворотов БИНС на заданные углы. При этом система переустанавливается в различные положения. Такой эксперимент сложно организуется, потому что часто требуется обратная связь от стенда, обработка данных происходит в процессе эксперимента, и может потребоваться изменение плана эксперимента в зависимости от результатов промежуточных вычислений. Иногда также калибровка осуществляется по отдельности для ньютонметров и ДУС, и тогда возникает дополнительная задача согласования координатных трехгранников, связанных с разными типами датчиков.

В лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова разработан метод калибровки ИНС, предполагающий калибровку системы именно в сборе, применимый в том числе и для грубых одностепенных стендов с горизонтальной осью вращения. Основной информацией для калибровки служат сигналы самих датчиков инерциальной информации. Этот метод лишен указанных выше недостатков, и нашел практическое применение на специализированных предприятиях [3–8].

2. Задача калибровки инерциальных систем

2.1. Функционирование стенда

Автоматизированный поворотный стенд включает в себя платформу (планшайбу), на которую жестко устанавливается БИНС. Платформа может совершать программные вращательные движения в рамках, допускаемых возможностями стенда. Реализация программных движений может быть достаточно грубой.

На точных стендах установлены высокоточные датчики углов, определяющие ориентацию платформы стенда относительно основания, и информация, доставляемая ими, используется в алгоритмах, определяющих параметры инструментальных погрешностей БИНС. В грубых стендах такие датчики отсутствуют.

По числу независимых осей вращения стенды могут быть одностепенными, двухстепенными и трехстепенными. Наиболее широкие возможности предоставляют по-

следние, на которых БИНС может совершать произвольные вращения без ее переустановки.

Свойства оцениваемости (обусловленности) определяемых калибровочных параметров зависят от эволюций установочной платформы, реализуемых стендом, или, на информационном языке, от значений матрицы ориентации приборного трехгранника относительно вращающейся Земли. Выбор программного движения платформы стенда должен осуществляться в рамках его возможностей, и с другой стороны, обеспечивать достаточно высокую обусловленность решения задачи. Такой выбор часто осуществляется исходя из здравого смысла.

2.2. Математическая модель инструментальных погрешностей БИНС

Требуемый состав параметров модели погрешностей инерциального измерительного блока и требования к точности их оценки могут быть различными и зависят от класса точности и назначения БИНС. Базовая модель инструментальных погрешностей включает в себя параметры:

- смещения нулевых сигналов ньютонометров;
- погрешности масштабных коэффициентов ньютонометров;
- малые углы перекосов осей чувствительности ньютонометров;
- систематические (постоянные) дрейфы ДУС;
- погрешности масштабных коэффициентов ДУС;
- перекосы осей чувствительности ДУС,
- шумовые составляющие показаний ньютонометров и ДУС.

Параметры стандартной математической модели инструментальных погрешностей БИНС привязаны к приборному трехграннику, в осях которого осуществляются измерения.

Модель погрешностей может быть расширена за счет включения в нее дополнительных параметров, например, таких как координаты приведенного центра БИНС относительно центра вращения стенда, параметры внутреннего разнесения чувствительных масс ньютонометров, температурные коэффициенты, параметры рассинхронизации измерительных каналов и др. [8-11].

2.3. Калибровка БИНС на грубых стендах

Основной информацией для калибровки служат показания самих инерциальных датчиков: ньютонометров и ДУС. Показано, что приемлемую точность калибровки обеспечивает вращение платформы стенда вокруг горизонтальной оси с некоторой угловой скоростью, организованное в виде трех циклов. На каждом цикле одна из приборных осей БИНС совмещается с горизонтальной плоскостью и является осью вращения (с точностью до инструментальных погрешностей стенда). В каждом цикле предусмотрено изменение направления вращения платформы.

На одностепенных стендах перед каждым новым циклом производится переустановка инерциального блока. На двухстепенных стендах вращение вокруг каждой из приборных осей БИНС можно осуществлять без переустановки системы.

Математическую модель алгоритма калибровки составляют: модельные кинематические уравнения БИНС (кинематические уравнения Пуассона), кинематические уравнения ошибок БИНС, модели инструментальных погрешностей, уравнения корректирующих измерений. Задача определения инструментальных погрешностей сводится к решению линейной задачи оценивания, при этом используется алгоритм калмановской фильтрации. В рамках методики калибровки возможны различные варианты [3].

Во-первых, имеются разные способы задания начальных условий для матрицы ориентации БИНС — начальная матрица может быть задана априорно или определена при помощи показаний датчиков БИНС, осредненных на интервале неподвижности перед началом вращения.

При включении интервалов неподвижности в программные движения появляется возможность использования инвариантов: величины силы тяжести, величины угловой скорости Земли, значения широты.

Кроме того, возможны варианты, когда в качестве основной информации от БИНС удобнее использовать вторичную информацию — координаты, составляющие скорости, углы ориентации, имеющиеся на выходе БИНС, функционирующей в навигационном режиме.

2.4. Калибровка БИНС на точных стендах

В случае калибровки БИНС на точных стендах к основной информации добавляется информация об ориентации платформы стенда, доставляемая соответствующими датчиками. Как правило, эту информацию технически сложно синхронизировать во время движения. Однако при наличии интервалов неподвижности в различных угловых положениях БИНС относительно стенда эти измерения существенно улучшают наблюдаемость в задаче оценки и позволяют точнее оценить параметры модели погрешностей, а также оценить дополнительные параметры, такие как установочные углы приборного трехгранника БИНС относительно платформы стенда.

3. Заключение

Описан методический подход к задаче стендовой калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем. Отражены две главных особенности метода:

- калибровка осуществляется именно для системы в сборе;
- в качестве основной информации при калибровке служат показания самих калибруемых датчиков – ньютонометров и ДУС.

Достоинствами метода являются: возможность калибровки ИНС на грубых одноосных стендах (не обеспечивающих высокой точности задания угловых положений, угловых скоростей); отсутствие жестких требований к плану операций; единый алгоритм обработки всей записи калибровочного эксперимента; широкие возможности расширения модели инструментальных погрешностей БИНС за счет включения в нее дополнительных параметров; возможность адаптации методики для точных стендов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-08-00015).

Список литературы

1. Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ГНЦ РФ ФГУП ЦНИИ «Электроприбор». 2008. С. 145-154.
2. Емельянцева Г.И., Блажнов Б.А., Драницына Е.В., Степанов А.П. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трехгранника // Гироскопия и навигация. 2016. № 1 (92). С. 36-48.
3. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть II. Математические модели инерциальной навигации / 2-е изд., испр. и доп. М.: МАКС Пресс Москва, 2012.

4. Парусников Н.А. Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы на стенде // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2009. № 4. С. 3-9.
5. Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Сазонов И.Ю. Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов // Современные проблемы математики и механики. 2009. Т. 1. С. 212-223.
6. Вавилова Н.Б., Сазонов И.Ю. Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на грубых стендах с одной степенью свободы // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2012. Т. 1, № 4. С. 64-66.
7. Вавилова Н.Б., Васинева И.А., Парусников Н.А. О стендовой калибровке авиационных бескарданных инерциальных навигационных систем // Электронный журнал Труды МАИ. 2015. № 84.
8. Вавилова Н.Б., Васинева И.А., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Парусников Н.А. Калибровка в инерциальной навигации // Фундаментальная и прикладная математика. 2018. Т. 22, № 2.
9. Козлов А.В., Сазонов И.Ю. Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учетом разнесения чувствительных масс ньютонометров // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. Т. 189, № 3. С. 27-35.
10. Козлов А.В., Тарыгин И.Е., Голован А.А., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А. Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: ГЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2017. С. 225-228.
11. Козлов А.В., Парусников Н.А., Вавилова Н.Б., Тарыгин И.Е., Голован А.А. Динамическая стендовая калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. Т. 195, № 1. С. 241-257.
12. Аврутов В.В.. О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров.// Киев: Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Приладобудування. 2010. № 40. С. 10-17.
13. Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А., Егоров Ю.Г., Некрасов А.В. Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 2. С. 3—17.
14. Б.В., Климович. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов. // Гироскопия и навигация. 2014. № 3 (86). С. 29-40.
15. Savage P.G. Improved strapdown inertial measurement unit calibration procedures // 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). USA, Monterey, CA: IEEE, 2018. 3. 522-533. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373422.
16. Веремеенко К. К., Галай И. А. Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде // Труды МАИ. Серия «Системы навигации. 2013. №. 1. С. 1-14.