

УДК 621.391.14

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ БИНС НА ГРУБЫХ И ТОЧНЫХ СТЕНДАХ

А. А. ГОЛОВАН, д. ф.-м. н., с. н. с.,

Н. Б. ВАВИЛОВА, к. ф.-м. н.,

И. А. ВАСИНЕВА,

А. В. КОЗЛОВ, к. ф.-м. н.,

Н. А. ПАРУСНИКОВ, д. ф.-м. н., профессор

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

О. А. ЗОРИНА, к. ф.-м. н.,

С. Е. КУХТЕВИЧ, к. ф.-м. н.,

А. В. ФОМИЧЕВ, к. ф.-м. н.

ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»

Рассматривается задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС). Под калибровкой понимается определение параметров модели инструментальных погрешностей чувствительных элементов путем обработки результатов экспериментов на специализированных стендах. Методика калибровки, разработанная в лаборатории управления и навигации МГУ им. М. В. Ломоносова, позволяет оценивать параметры модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков как с использованием информации от стенда, так и без таковой. Показана эффективность методики на основе ковариационного анализа и обработки реальных данных.

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

BINS CALIBRATION TECHNIQUE ON ROUGH AND PRECISION RIGS

A. A. GOLOVAN, Dr. Sci. in Phys. and Math.,

N. B. VAVILOVA, PhD in Phys. and Math.,

I. A. VASINEVA,

A. V. KOZLOV, PhD in Phys. and Math.,

N. A. PARUSNIKOV, Dr. Sci. in Phys. and Math., the professor

Lomonosov Moscow State University

O. A. ZORINA, PhD in Phys. and Math.,

S. E. KUKHTEVICH, PhD in Phys. and Math.,

A. V. FOMITCHYOV, PhD in Phys. and Math.

'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC

The article considers the problem of strapdown inertial navigation system (SINS) calibration. By calibration is meant the determination parameters of sensors instrument errors model by processing of experiments results on specialized rigs. The calibration technique developed in control and navigation laboratory of the Lomonosov Moscow State University, allows to evaluate parameters of inertial sensors instrument errors model both with and without information from the bench. The article shows the efficiency of the technique based on the covariance analysis and real data processing.

Keywords: strapdown inertial navigation system, calibration, test rig, instrument errors, Kalman filter.

Введение

Калибровка чувствительных элементов является важной частью технологического процесса производства бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС). Калибровка состоит в определении параметров математической модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков с целью последующей компенсации этих погрешностей в режимах выставки и навигации. Математическая модель погрешностей задается априорно.

Традиционные способы калибровки, осуществляемые на специализированных стендах, чаще всего состоят в определенной последовательности поворотов БИНС. Обычно такой эксперимент сложно организовать, потому что содержит многочисленные повороты и нередко требуется обратная связь от стенда, обработка данных проводится в процессе эксперимента и необходимо изменение плана в зависимости от результатов промежуточных вычислений. Кроме того, в некоторых известных методиках калибровочными сигналами для датчиков угловых скоростей (ДУС) служит угловая скорость Земли, что не обеспечивает хорошую обусловленность задачи оценки. Иногда также калибровка осуществляется по отдельности для акселерометров и ДУС, и тогда возникает задача согласования координатных трехгранников, связанных с разными типами датчиков.

В лаборатории управления и навигации МГУ имени М. В. Ломоносова разработаны новые более естественные методы калибровки БИНС в сборе на грубых и точных стендах. Первоначально метод сформулирован применительно к грубым стендам [1, 2]. Под условным термином «грубые» принимаются стенды, в которых не используется угловая информация о положении платформы стенда относительно корпуса стенда. В дальнейшем этот метод был применен для калибровки и на точных стендах, в которых такая информация используется [3].

Краткое описание метода калибровки

Идея метода состоит в том, что при вращении БИНС вокруг неподвижного приведенного центра возникает избыточность в информации об ориентации системы — она может быть получена как на основе данных ДУС путем интегрирования уравнений Пуассона, так и данных акселерометров, содержащих проекции удельной силы тяжести на оси приборного трехгранника. При этом погрешности определения ориентации вызваны инструментальными погрешностями соответствующих трактов чувствительных элементов [4]. В работах [1, 2] определен такой план вращений, на котором все параметры модели инструментальных погрешностей ДУС и акселерометров разделяются (являются наблюда-

емыми). Таким образом, становится возможной калибровка БИНС на стенде без использования информации от него, то есть на грубом стенде.

В зависимости от типа используемой входной информации возможны 2 варианта построения алгоритма калибровки — с использованием первичной и вторичной информации. В первом случае исходными данными являются данные от ДУС и акселерометров, зарегистрированные с высокой частотой (50 Гц и более). Во втором случае требуется, чтобы система была предварительно грубо откалибрована так, чтобы ее навигационные ошибки описывались на интервале калибровки линейными уравнениями ошибок. Тогда исходными данными для алгоритма калибровки служат выходные параметры БИНС — координаты, скорости, углы ориентации. В обоих случаях известными считаются широта и высота места установки стенда.

В первом случае задача сводится к оценке вектора состояния [5], включающего в себя ошибки определения ориентации и систематические составляющие модели инструментальных погрешностей — дрейфы датчиков угловой скорости (ДУС) v_1^0, v_2^0, v_3^0 , погрешности их масштабных коэффициентов $\Theta_{ii}, i=1,2,3$, перекосы осей чувствительности $\Theta_{ij}, i \neq j, i, j=1,2,3$, погрешности нулей акселерометров $\Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0$, масштабных коэффициентов и перекосы осей чувствительности акселерометров $\Gamma_{11}, \Gamma_{21}, \Gamma_{22}, \Gamma_{23}, \Gamma_{31}, \Gamma_{33}$. В зависимости от типа ДУС могут быть добавлены параметры динамических дрейфов ДУС. Кроме того, для учета возмущений в показаниях акселерометров, возникающих при вращении из-за того, что чувствительные массы акселерометров не лежат на оси вращения, в вектор состояния могут быть включены параметры отнесения чувствительных масс от оси вращения. В [3] показано, что эти параметры являются оцениваемыми, и точность калибровки при этом не ухудшается.

Во втором случае в вектор состояния добавляются динамические ошибки определения скорости БИНС и ошибки определения координат.

Применяется алгоритм оценивания калмановского типа.

В том случае, когда привлекается информация от датчиков стенда об ориентации платформы относительно базы стенда, в алгоритм оценивания добавляются дополнительные корректирующие измерения. При этом приходится учитывать погрешности измерения углов, неточность установки БИНС и погрешности синхронизации информационных потоков во времени путем включения этих параметров в вектор состояния. В [6] показано, что параметры погрешностей стенда на описанном ниже плане эксперимента также являются оцениваемыми с приемлемой точностью.

Программные движения стенда

Для максимально возможной обусловленности решения задачи предложена процедура калибровки, включающая в себя три цикла. В каждом цикле приборные оси БИНС последовательно совмещаются (с точностью до погрешностей установки) с осью вращения платформы стенда. При этом ось вращения лежит приблизительно в горизонтальной плоскости.

Угловая скорость выбирается в виде кусочно-постоянной функции.

Ковариационный анализ

При анализе точности алгоритма основным инструментом исследования является ковариационный анализ, который позволяет учесть уровень шумов в системе и корректирующих измерениях. При ковариационном анализе были выбраны следующие близкие к реальным априорные характеристики для параметров инструментальных погрешностей в виде их среднеквадратических значений. $\sigma_{v^0} = 0,5$ °/час, $0,02$ м/с², $\sigma_{\Gamma_{ii}} = \sigma_{\Theta_{ii}} = 10^{-3}$, $\sigma_{\Gamma_{ij}} = \sigma_{\Theta_{ij}} = 3' (i \neq j)$. Предполагается, что между собой они не коррелированы. При моделировании стандартные отклонения белых шумов в ДУС полагаются равными $0,1$ °/час на частоте 1 Гц, а стандартные отклонения шумов ньютонометров $\sigma_{\Delta f^0} = 0,001$ м/с² на частоте 1 Гц. Погрешности информации от стенда: $\sigma_{\delta_i} = 1^\circ$, $\sigma_t = 0,05$ с, $\sigma_{\Delta \kappa_i} = 15''$ на частоте 1 Гц. Задаются программные движения стенда (демонстрационный вариант) такие, что продолжительность каждого цикла 15 минут. Выбирается кусочно-постоянная угловая скорость. Период на одном цикле выбирается так, чтобы за половину длительности цикла происходило изменение угла с угловой скоростью $10^\circ/\text{с}$, далее изменение этого угла со скоростью $-10^\circ/\text{с}$.

Результаты оценивания без использования информации от стенда приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оценивания без использования информации от стенда

	$v_z^0, ^\circ/\text{час}$	Θ_{ii}	$\Theta_{ij}, '$	$\Delta f_z^0, \text{м/с}^2$	Γ_{ii}	$\Gamma_{ij}, '$
σ	0,01	$5,1 \cdot 10^{-7}$	0,1	$9 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	0,1

Результаты оценивания с использованием информации от стенда приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценивания с использованием информации от стенда

	$v_z^0, ^\circ/\text{час}$	Θ_{ii}	$\Theta_{ij}, '$	$\Delta f_z^0, \text{м/с}^2$	Γ_{ii}	$\Gamma_{ij}, '$
σ	0,003	$9,7 \cdot 10^{-8}$	0,05	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	0,05

Для того чтобы провести сравнение между собой результатов калибровки с использованием измерений от точного стенда и результатов без использования таковых, проведено моделирование дисперсионного уравнения ошибок автономной навигации на траектории «змейка». В начальные условия для ковариационной матрицы ошибок БИНС в блоке инструментальных погрешностей подставлялись значения, полученные в результате калибровки, а ошибки выставки также определялись результатами калибровки. Моделировался полет самолета по данной траектории в течение 1 часа. Критерием качества калибровки была выбрана величина $\rho = a\sqrt{\sigma_{\Delta\lambda \cos \varphi}^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2}$, где a — длина большой полуоси навигационного эллипсоида, $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ — ошибки в определении широты и долготы. После калибровки без использования измерений точного стенда ошибка автономной навигации составила 1900 м, при использовании новых измерений — 1100 м. Таким образом, использование новых измерений позволяет без усложнения плана калибровки и увеличения времени повысить качество калибровки БИНС и улучшить точность автономной навигации в 1,7 раза.

Пример обработки реальных данных эксперимента с БИНС-СП-2

На стенде IXBlue EVO 30 L были проведены эксперименты с БИНС-СП-2 от 28.01.16 и 04.02.16. Эксперименты состояли из трех циклов длительностью 40 минут, в каждом из которых соответствующая приборная ось БИНС становилась горизонтальной осью вращения. Угловая скорость вращения была кусочно-постоянной и принимала два значения — 2 °/с и 5 °/с. В обоих экспериментах система после выставки была переведена в навигацию. В первом эксперименте БИНС накопила порядка 15 км ошибки в определении координат, во втором — порядка 12 км. Обработка экспериментов проводилась с использованием вторичной информации. При этом первый эксперимент использовался для оценки параметров инструментальных погрешностей, т. е. для калибровки, а второй — для компенсации погрешностей на основе оценок, полученных в первом эксперименте.

На рис. 1 приведены погрешности определения координат БИНС во втором эксперименте — исходные погрешности и погрешности после компенсации.

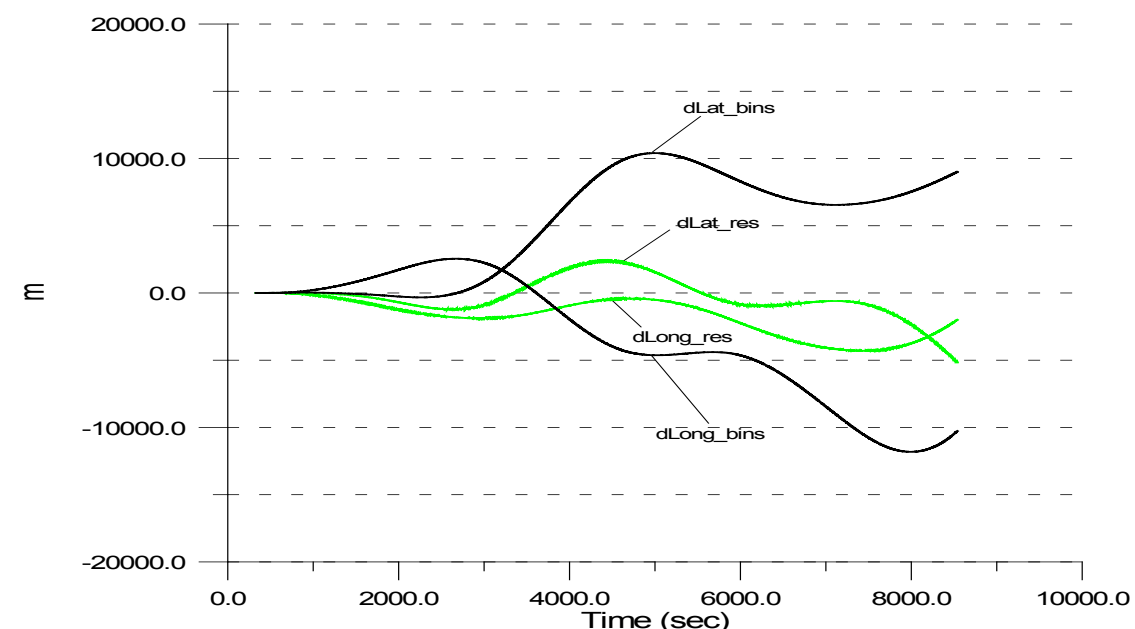


Рис. 1. Ошибки БИНС определения координат до ($dLat_bins$, $dLong_bins$) и после компенсации ($dLat_res$, $dLong_res$)

Графики показывают, что исходные погрешности уменьшились, по крайней мере, в 3 раза, что доказывает перспективность применения предложенного метода на стенде IXBlue EVO 30 L.

Выводы

Предложенные методы калибровки могут быть рекомендованы к сравнению с штатным способом калибровки БИНС, используемым в МИЭА. Пример обработки реальных данных показал, что оценки, полученные в результате обработки эксперимента, приемлемы.

Литература

1. Парусников Н. А. Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы на стенде // М.: Изв. РАН МТТ, 2009, № 4, с. 3-6.
2. Вавилова Н. Б., Парусников Н. А., Сазонов И. Ю. // Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов. Современные проблемы математики и механики. Том I. Прикладные исследования, М.: Изд-во МГУ, 2009.
3. Козлов А. В., Сазонов И. Ю. Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учетом разнесения чувствительных масс ньютонометров. Научный вестник МГТУ ГА, том 189, № 3, с. 27-35
4. Голован А. А., Парусников Н. А. // Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. 3-е изд., испр. и доп. — М.: МАКС Пресс, 2011.
5. Голован А. А., Парусников Н. А. // Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: МАКС Пресс, 2012.
6. Парусников Н. А., Вавилова Н. Б., Васинёва И. А. О стендовой калибровке авиационных бескарданных инерциальных навигационных систем // Электронный журнал «Труды МАИ», № 84.

УДК 629.7.054.07

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРЦЕВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

С. Ю. ДЕНИСОВ

ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»,

В. И. АКИЛИН, к. т. н.

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Описана методика контроля выходных параметров прецизионных маятниковых кварцевых акселерометров с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ), предполагающая осуществлять контроль выходных параметров приборов через равные промежутки времени при непрерывном равномерном изменении температуры в термокамере с испытуемым прибором по алгоритму, задаваемому управляющим устройством АРМ, что позволило повысить объективность процесса контроля выходных параметров кварцевых акселерометров при воздействии температуры окружающей среды. Изложена методика технологической приработки приборов после итоговой сборки, позволяющая в условиях серийного производства данных приборов добиться значительного уменьшения нестабильности значений их технических параметров от запуска к запуску. Описана методика алгоритмической компенсации основной части систематической составляющей температурной зависимости акселерометров, позволяющая существенно повысить их точность при работе в составе информационных и управляющих систем.

Ключевые слова: акселерометр, непрерывное изменение температуры, нестабильность параметров.

TECHNOLOGICAL METHODS OF QUARTZ ACCELEROMETERS ACCURACY PERFORMANCE IMPROVEMENT

S. U. DENISOV

'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC

V. I. AKILIN, Phd in Engineering

'Moscow Aviation Institute (National Research University)'

The article describes a procedure for the precision pendulous quartz accelerometer outputs checking, aided by an automated workstation (APM), which is intended to check the instrument outputs in regular intervals, during the continuous changes of the temperature in a heat chamber, containing the UUT, according to the algorithm assigned by APM controller. Simultaneously, the speed of temperature changes in the heat chamber is approximated to the speed of SINS temperature changes while in operation, providing the increase of quartz accelerometer output parameters checking process credibility under the environmental temperature. The article shows a method of the instruments post-assembly technological adjustment, that allows achieving a considerable reduction in run to run technical parameter values instability in series production of such instruments. The article describes a method for algorithmic compensation of the main part of accelerometer temperature dependence systematic component, providing the considerable increase in their operational accuracy as part of information and control systems.

Keywords: accelerometer, continuous temperature change, parameters instability.