

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Е. В. ДРАНИЦЫНА, Б. А. БЛАЖНОВ

О КАЛИБРОВКЕ БЕСКАРДАННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА ВОГ В УСЛОВИЯХ СТЕНДА

Приводятся основные положения калибровки бескарданного инерциального измерительного модуля (БИИМ) на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) в динамических условиях на стенде. В качестве эталонной информации используются расчетные данные о составляющих вектора линейной скорости и координатах места точки размещения блока акселерометров БИИМ, установленного на платформе стенда.

Оценка точности предложенной калибровки проводится по результатам испытаний БИИМ на ВОГ фирмы IXSEA (Франция) на трехосном стенде ф. Acutronic.

Введение

При стендовых испытаниях БИИМ осуществляется калибровка коэффициентов моделей выходных сигналов гироскопов и акселерометров, а также привязка их измерительных осей к осям БИИМ. При этом осуществляется вращение платформы стенда с разными значениями угловой скорости последовательно вокруг всех трех осей. В качестве эталонной информации обычно используются данные о начальном угловом положении платформы стенда относительно осей географического трехгранника и измеряются приращения углов поворота платформы с изменением знака угла поворота. Как правило, фиксируется целое число оборотов за конечный интервал времени. Для формирования измерений используется либо среднее значение угловой скорости вращения платформы стенда, либо значение угла поворота [1–4]. Синхронно со списыванием угла поворота платформы стенда осуществляется опрос гироскопов и акселерометров, а также встроенных датчиков температуры. При этом учитываются значения проекций векторов угловой скорости вращения Земли и ускорения силы тяжести на оси БИИМ.

Соответствующая обработка осредненных значений данных чувствительных элементов БИИМ и эталонных данных стенда позволяет находить значения смещений нулей, масштабных коэффициентов, неортогональностей измерительных осей гироскопов и акселерометров, коэффициенты их температурных моделей и т.п.

Следует отметить, что использование в качестве эталонной информации данных об угловом положении платформы стенда приводит к тому, что осуществляется привязка измерительных осей гироскопов и акселерометров к осям

Емельянец Геннадий Иванович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Драницына Елена Викторовна. Аспирант ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Блажнов Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

стенда и, следовательно, к осям БИИМ, что влияет на точность выработки параметров ориентации объекта. При этом существенное значение здесь имеют погрешности привязки осей БИИМ к осям стенда.

Для точного решения навигационной задачи инерциальным методом необходимо обеспечить привязку измерительных осей гироскопов к измерительным осям акселерометров. Эту проблему можно решить, если в качестве эталонной информации использовать не данные об угловом положении платформы стенда, а линейные скорости и географические координаты точки установки триады акселерометров БИИМ на платформе стенда.

В работах [5-7] приведены упрощенные решения поставленной задачи с опорой на скоростные или позиционные измерения, так как используются относительно простые расчетные модели погрешностей БИИМ, справедливые для ограниченного интервала времени. В данной статье рассматривается более полное решение, когда оценка неортогональностей измерительных осей гироскопов и акселерометров производится одновременно с оценкой их смещений нулей и масштабных коэффициентов, при этом одновременно используются как скоростные, так и позиционные измерения.

Модель погрешностей ВОГ и акселерометров

Модель дрейфов $\Delta\omega_{bi}$ ВОГ в измерении составляющих вектора $\vec{\omega}_b$ угловой скорости представлена в виде суммы нескольких составляющих [8]:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{bi} &= \Delta\bar{\omega}_{bi} + \Delta\tilde{\omega}_{bi} + \Delta\omega_{Nbi} + \Delta\omega_{bi}^f, \quad i = x, y, z, \\ \Delta\dot{\tilde{\omega}}_{bi} &= \sqrt{Q_{gi}} \cdot \xi(t), \quad \Delta\bar{\omega}_{bi}(t_0), \\ \Delta\tilde{\omega}_{bi} &= \omega_{bi} \cdot \Delta M_{gi}, \\ \Delta\dot{M}_{gi} &= \sqrt{Q_{Mgi}} \cdot \xi(t), \quad \Delta M_{gi}(t_0), \\ \Delta\vec{\omega}_{Nb} &= \begin{bmatrix} 0 & G_{xz} & -G_{xy} \\ -G_{yz} & 0 & G_{yx} \\ G_{zy} & -G_{zx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{\omega}_b, \quad \vec{\omega}_b = \begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Delta\bar{\omega}_{bi}$ – погрешность начальной калибровки смещения нуля и его нестациональности в пуске, квазисистематическая составляющая с начальным уровнем $\Delta\bar{\omega}_{bi}(t_0)$ и интенсивностью Q_{gi} ; $\Delta\tilde{\omega}_{bi}$ – составляющая, зависящая от погрешности масштабного коэффициента ΔM_{gi} ; ΔM_{gi} характеризуется начальным уровнем $\Delta M_{gi}(t_0)$ и интенсивностью Q_{Mgi} ; $\Delta\omega_{Nbi}$ – составляющая, обусловленная неортогональностями G_{ij} ($i, j = x, y, z$) измерительных осей блока ВОГ; $\Delta\omega_{bi}^f$ – шумовая составляющая, характеризующая флуктуационные погрешности гироскопов и аппроксимированная белым шумом с интенсивностью Q_{gi}^f .

При этом погрешности $\Delta\bar{\omega}_{bi}$, ΔM_{gi} , G_{ij} вследствие отсутствия достоверных данных о спектре их изменчивости были аппроксимированы винеровскими процессами при соответствующих начальных дисперсиях.

Модель погрешностей линейных акселерометров была представлена аналогичным образом:

$$\begin{aligned}\Delta a_{bi} &= \Delta \bar{a}_{bi} + \Delta \tilde{a}_{bi} + \Delta a_{Nbi} + \Delta a_{bi}^f, \quad i = x, y, z, \\ \Delta \dot{\tilde{a}}_{bi} &= \sqrt{Q_A} \cdot \xi(t), \quad \Delta \bar{a}_{bi}(t_0), \\ \Delta \tilde{a}_{bi} &= n_{bi} \cdot \Delta M_{ai}, \\ \Delta \dot{M}_{ai} &= \sqrt{Q_{Mai}} \cdot \xi(t), \quad \Delta M_{ai}(t_0), \\ \Delta \vec{a}_{Nb} &= \begin{bmatrix} 0 & A_{xz} & -A_{xy} \\ -A_{yz} & 0 & A_{yx} \\ A_{zy} & -A_{zx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{n}_b, \quad \vec{n}_b = \begin{bmatrix} n_{bx} \\ n_{by} \\ n_{bz} \end{bmatrix},\end{aligned}\tag{2}$$

где $\Delta \bar{a}_{bi}$ – погрешность начальной калибровки смещения нуля и его нестабильности в пуске, квазисистематическая составляющая с начальным уровнем $\Delta \bar{a}_{bi}(t_0)$ и интенсивностью Q_A ; $\Delta \tilde{a}_{bi}$ – составляющая, зависящая от погрешности масштабного коэффициента ΔM_{ai} ; ΔM_{ai} характеризуется начальным уровнем $\Delta M_{ai}(t_0)$ и интенсивностью Q_{Mai} ; Δa_{Nbi} – составляющая, обусловленная неортогональностями $A_{ij}(i, j = x, y, z)$ измерительных осей блока ВОГ; Δa_{bi}^f – шумовая составляющая, характеризующая флуктуационные погрешности гироскопов и аппроксимированная белым шумом с интенсивностью Q_{ai}^f ; $\vec{n}_b$ – измеряемое акселерометрами кажущееся ускорение в осях БИИМ.

Постановка задачи

Полагаем, что калибровка коэффициентов моделей выходных сигналов гироскопов и акселерометров в динамических условиях трехосного стенда произведена традиционно с опорой на данные об угловом положении платформы стенда. Дадим оценку точности этой калибровки, включая и оценку погрешностей взаимной привязки измерительных осей гироскопов и акселерометров, опираясь при этом только на навигационное решение.

Скоростные измерения

$$z_{V_i}(t_{k+1}) = V_i^{pr}(t_{k+1}) - V_i^{et}(t_{k+1}), (i = E, N, H),\tag{3}$$

где $\vec{V}_h^{pr} = [V_E^{pr} \ V_N^{pr} \ V_H^{pr}]^T$ – значения составляющих вектора линейной скорости БИИМ в проекциях на оси географического сопровождающего трехгранника ENH в точке размещения триады акселерометров в БИИМ; $\vec{V}_h^{et} = [V_E^{et} \ V_N^{et} \ V_H^{et}]^T$ – эталонные значения составляющих вектора линейной скорости в условиях стенда.

Эталонные значения составляющих вектора $\vec{V}_h^{et}$ вычисляются по следующим формулам:

$$\vec{V}_b^{et} = \left(\frac{\nabla f_b}{dT} - C_{b,h}^T \vec{U}_h \right) \times \vec{r}_0,$$

$$\vec{V}_h^{et} = C_{b,h} \cdot \vec{V}_b^{et}. \quad (4)$$

Здесь $\vec{V}_b^{et} = [V_X^{et} \ V_Y^{et} \ V_Z^{et}]^T$ – эталонные значения составляющих вектора линейной скорости БИИМ в проекциях на связанные оси; $\nabla \vec{f}_b$ – вектор приращений на рабочей частоте $(1/dT)$ угла поворота БИИМ в связанных осях, измеряемый блоком гироскопов; $\vec{U}_h$ – вектор угловой скорости вращения Земли в проекциях на географические оси; $\vec{r}_0$ – вектор отстояния блока акселерометров от центра качания в проекциях на оси БИИМ; $C_{b,h}$ – матрица ориентации БИИМ.

Позиционные измерения:

$$\begin{aligned} z_\varphi(t_{k+1}) &= \varphi^{pr}(t_{k+1}) - \varphi^{et}(t_{k+1}), \\ z_\lambda(t_{k+1}) &= \lambda^{pr}(t_{k+1}) - \lambda^{et}(t_{k+1}), \\ z_h(t_{k+1}) &= h^{pr}(t_{k+1}) - h^{et}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varphi^{pr}, \lambda^{pr}, h^{pr}$ – значения географических координат (широта, долгота и высота места) вырабатываемые БИИМ; $\varphi^{et}, \lambda^{et}, h^{et}$ – эталонные значения географических координат БИИМ на стенде.

Расчетная модель погрешностей БИИМ

Положим, что режим начальной выставки БИИМ завершен. Взаимная ориентация географического трехгранника ENH и трехгранника xuz , который является его приборным аналогом, определяется вектором $\vec{\Lambda}_h = [\beta \ \gamma \ \alpha]^T$ малого поворота – вектором Эйлера. Здесь угол α характеризует разворот трехгранника xuz вокруг вертикали места – погрешность по курсу, а углы β, γ характеризуют погрешности построения вертикали места соответственно в плоскости меридиана места и в плоскости первого вертикала. В этом случае погрешности БИИМ могут быть описаны линеаризованной относительно алгоритмов идеальной работы моделью в виде [7]:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_{k/k+1} \cdot x_k + \Gamma_{k/k+1} \cdot w_k, \\ z_{k+1} &= H_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где
$$x^T = \begin{bmatrix} \alpha \ \beta \ \gamma \ \Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta V_H \ \Delta \varphi \ \Delta \lambda \ \Delta h \ \Delta \bar{\omega}_{xb} \ \Delta \bar{\omega}_{yb} \ \Delta \bar{\omega}_{zb} \\ \Delta \bar{\alpha}_{xb} \ \Delta \bar{\alpha}_{yb} \ \Delta \bar{\alpha}_{zb} \ \Delta M_{gx} \ \Delta M_{gy} \ \Delta M_{gz} \ \Delta M_{ax} \ \Delta M_{ay} \ \Delta M_{az} \ G_{xy} \ G_{yz} \ G_{zx} \\ G_{yz} \ G_{zx} \ G_{zy} \ A_{yz} \ A_{zx} \ A_{zy} \end{bmatrix} -$$

вектор состояния системы; $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_H$ – погрешности БИИМ в выработке составляющих вектора линейной скорости; $\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h$ – погрешности БИИМ в выработке географических координат; $\Phi_{k/k+1}$ – переходная на шаге Tz матрица состояния системы (6) для момента времени t_{k+1} .

Формирование переходной матрицы $\Phi_{k/k+1}$ состояния системы для интервала Tz измерений:

$$\Phi_{j/j+1} \cong E_{n \times n} + F(t_j) \cdot dT + \frac{1}{2} [F(t_j) \cdot dT]^2 + \dots;$$

$$\Phi_{k/j+1} = \Phi_{j/j+1} \cdot \Phi_{k/j}; \quad (8)$$

при $j = k$ $\Phi_{k/j+1} = \Phi_{k/k+1}$ – искомое значение переходной матрицы $\Phi_{k/k+1}$; $\Phi_{k/j=0} = E_{n \times n}$; $E_{n \times n}$ – единичная матрица размерности (30×30) ; $F(t_k)$ – матрица динамики системы; j – оператор дискретности на рабочей частоте $1/dT$, $dT = t_{j+1} - t_j$; k – оператор дискретности на частоте измерений $1/Tz$, $Tz = t_{k+1} - t_k$.

Оценка погрешностей БИИМ на ВОГ по навигационному решению

Исследование модельной задачи при задании различных тестовых движений позволило сформировать наиболее эффективные угловые движения платформы стенда, обеспечивающие полную наблюдаемость всех составляющих модели погрешностей БИИМ. При этом используются известные [9, 10] реверсные вращения БИИМ последовательно вокруг всех трех осей. При выборе параметров тестовых движений платформы стенда проводился контроль наблюдаемости оцениваемых параметров с использованием ковариационного канала фильтра Калмана по уровню снижения их начальной неопределенности $\sigma_{\tilde{x}i}(t_0)$ – СКО i -й составляющей вектора состояния x . При достижении $\sigma_{\tilde{x}i}(t)/\sigma_{\tilde{x}i}(t_0)$ уровня 0,1 решение считалось успешным.

Таким образом, суть предлагаемой калибровки по навигационному решению состоит в следующем: задается сформированная программа тестовых угловых движений платформы стенда, обеспечивающая наилучшую наблюдаемость подлежащих дополнительной калибровке параметров, после проведения обработки результатов испытаний в соответствии с описанными выше алгоритмами проводится оценка остаточных погрешностей калибровки.

Для отработки предлагаемой методики по оценке точности стендовой калибровки БИИМ использовался измерительный модуль IMU-120 ф. IXSEA (Франция), внешний вид и характеристики которого приведены на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид и характеристики IMU-120

Габаритные размеры.....	16×16×16 см
Масса.....	3,8 кг
Рабочий диапазон температур.....	-10...+50 °C

Характеристики ВОГ

Динамический диапазон.....	±260 °/с
Стабильность смещения нуля.....	0,01 °/ч
Стабильность МК.....	30 ppm

Характеристики акселерометров

Динамический диапазон.....	±18 g
Стабильность смещения нуля.....	< 500 μg
Стабильность МК.....	< 500 ppm

Модуль IMU-120 поставляется с уже найденными и введенными коэффициентами моделей выходных сигналов гироскопов и акселерометров. Прибор устанавливался на платформе трехосного стенда Acutronic, неортогональность

осей которого менее $6''$, точность позиционирования $3''$, стабильность скорости за оборот $0,0005\%$.

Значения параметров расчетной модели погрешностей гироскопов и акселерометров модуля IMU-120 были выбраны из анализа их спектров, полученных по данным стендовых испытаний на неподвижном основании (рис. 2). СКО бел шумных составляющих погрешностей на 1 Гц для ВОГ $0,2^\circ/\text{ч}$, для акселерометров $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$. Частота подъема спектра в низкочастотной области, характеризующая СКО порождающего шума для винеровского процесса, для ВОГ 10^{-4} Гц , для акселерометров 10^{-3} Гц .

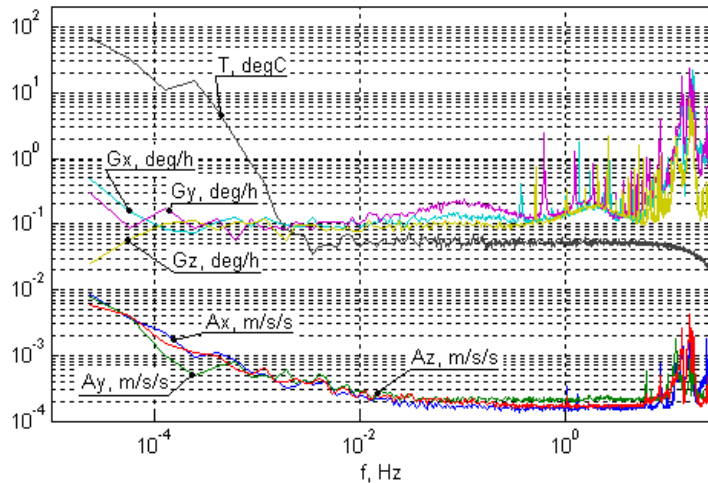


Рис. 2. Уровень спектральной плотности шумов, приведенный к частоте 1 Гц

Как видно из спектров, в условиях естественного изменения температуры в спектрах шумов акселерометров наблюдается незначительный подъем в низкочастотной области, а в спектрах ВОГ он вообще отсутствует, что позволяет обеспечить возможность проведения калибровки в течение длительного времени без использования специальных систем термостатирования.

Ниже приведены графики (рис. 3, 4), характеризующие погрешности калибровки основных параметров прибора по анализу навигационного решения. Было проведено несколько испытаний в разных запусках системы, которые показали хорошую сходимость результатов обработки данных.

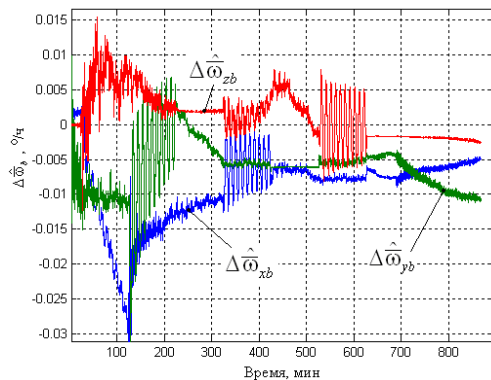


Рис. 3. Оценки смещений нулей ВОГ

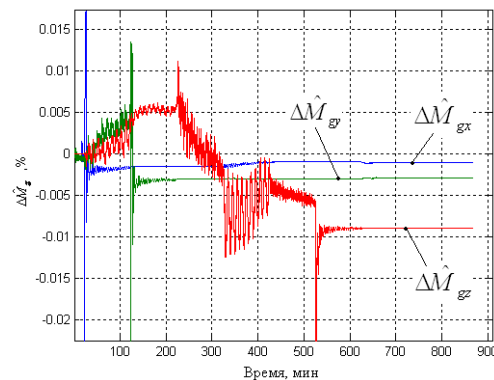


Рис. 4. Оценки погрешностей масштабных коэффициентов ВОГ

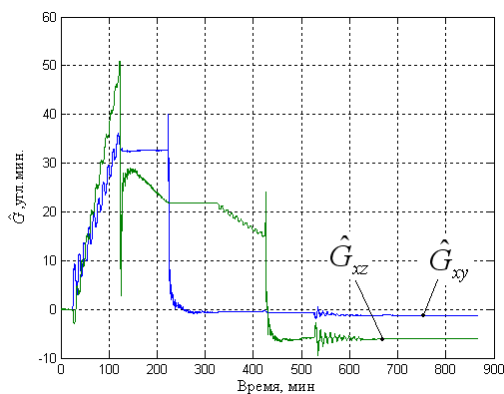


Рис. 5. Оценки неортогональностей измерительных осей ВОГ_x

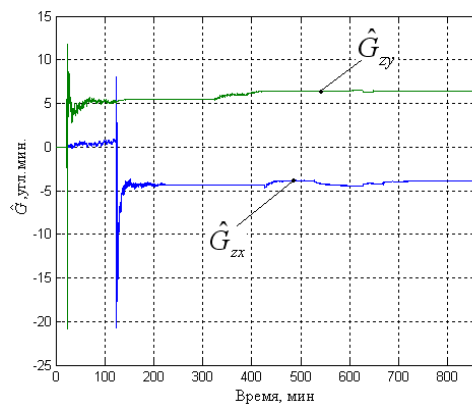


Рис. 6. Оценки неортогональностей измерительных осей ВОГ_z

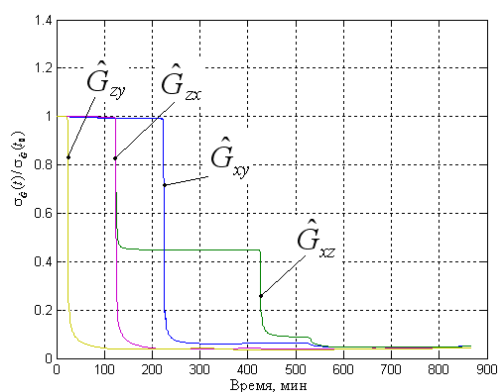


Рис. 7. Значения относительных СКО $(\sigma_{\hat{G}}(t)/\sigma_{\hat{G}}(t_0))$ ошибок оценок неортогональностей измерительных осей ВОГ, начальные СКО = 6 угл. с

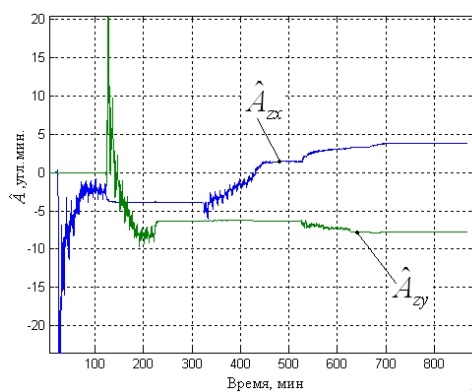


Рис. 8. Оценки неортогональностей измерительных осей A_z

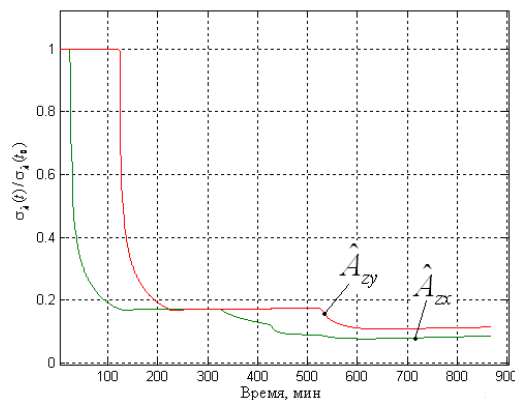


Рис. 9. Значения относительных СКО $(\sigma_{\hat{A}}(t)/\sigma_{\hat{A}}(t_0))$ ошибок оценок неортогональностей измерительных осей акселерометров, начальные СКО = 3 угл. с

На рис. 5, 6 приведены оценки неортогональностей измерительных осей ВОГ относительно измерительных осей акселерометров; рис. 7 показывает, что наблюдаемость неортогональностей осей ВОГ обеспечивается только после задания полного набора тестовых движений платформы стенда; на рис. 8 – оценка неортогональностей измерительных осей акселерометра A_z .

Из приведенных рисунков следует, что погрешности калибровки IMU-120 ф. IXSEA, проведенной при изготовлении, находятся на уровне $0.01^\circ/\text{ч}$ – для смещений нулей ВОГ; 0.01% – для масштабных коэффициентов и 5° – для неортогональностей измерительных осей ВОГ.

В таблице приведены результаты привязки осей гироскопов к осям акселерометров по средствам традиционной калибровки основных параметров прибора.

Параметр	G_{xy}	G_{xz}	G_{zx}	G_{zy}
Калибровка 1	-19,2"	-26,8"	-21,7"	-11,3"
Калибровка 2	-20,6"	-23,4"	-22,9"	-10,4"

Приведенные на графиках значения неортогональностей в некоторых случаях на $10\text{--}20^\circ$ с отличаются от значений, полученных при проведении традиционной калибровки. Это обусловлено тем, что в данном случае отсутствуют дополнительные погрешности, связанные с промежуточной привязкой осей гироскопов и акселерометров к осям стенда; т.е. обеспечивается непосредственная привязка измерительных осей гироскопов к измерительным осям акселерометров, что собственно и необходимо для точного решения навигационной задачи.

Выводы

1. Разработана процедура калибровки погрешностей БИИМ на ВОГ по навигационному решению в динамических условиях стенда, обеспечивающая оценку взаимной неортогональности измерительных осей гироскопов и акселерометров на фоне оценок смещений нулей и погрешностей их масштабных коэффициентов.

В качестве эталонной информации используются расчетные данные о составляющих вектора линейной скорости и координатах места точки размещения триады акселерометров БИИМ на платформе стенда.

2. Путем имитационного моделирования была выбрана наиболее эффективная по уровню наблюдаемости погрешностей БИИМ последовательность угловых поворотов платформы стенда.

3. Предлагаемая калибровка опробована при стендовых испытаниях БИИМ на ВОГ ф. IXSEA на трехосном стенде ф. Acutronic. Оценка точности калибровки неортогональностей измерительных осей гироскопов и акселерометров находится на уровне $2\text{--}3^\circ$ (3 σ), что подтверждается как анализом работы ковариационного канала фильтра Калмана, так и сходимостью результатов обработки данных в разных запусках системы.

4. Предлагаемая методика обеспечивает проверку точности проведенной традиционной калибровки с учетом ее точностных возможностей и позволяет

повысить точность калибровки относительного положения осей акселерометров и гироскопов на уровне 2...3 угл. с (3σ), недоступной для традиционной калибровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волынский, Д.В.** Калибровка волоконно-оптических гироскопов в составе бескарданных инерциальных измерительных модулей / Д.В.Волынский [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. - № 2. - С. 56-68.
2. **Syed Z.F., Aggarwal P., Goodall C. and others.** A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems // IOP Publishing. Meas. Sci. Technol. 18 (2007), p. 1897-1907.
3. **Bogatsky I., Leonets O.** A procedure for high-accuracy calibration of strapdown IMU on a low-accuracy turntable // Proceedings of 2010 international symposium on internal technology and navigation, 2010, p.294-310.
4. **Zhao Gui-ling, Gao Wei, Zhang Xin, Ben Yue-yang.** A closed-loop iterative calibration for marine high precision fiber optic gyro unit. Proceedings of 2010 international symposium on internal technology and navigation, 2010, p. 86-93.
5. **Xu Bo, Sun Feng.** A FOG calibration research based on high-precision three-axis turntable. IEEE 978-0-7695-3519-7/09, 2009, p.454-458.
6. **Измайлов, Е.А.** Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е.А. Измайлов [и др.] // XV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2008. – С. 145-154.
7. **Атаманов, Н.А.** Калибровка блока чувствительных элементов БИНС / Н.А. Атаманов [и др.] // XII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – С. 162-164.
8. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцева. – СПб.: НИИ «Электроприбор», 2003. – С. 389 с.
9. **Емельянцева, Г.И.** О румбовых дрейфах бескарданного инерциального модуля на ВОГ / Г.И.Емельянцева, Л.П.Старосельцев, С.В.Игнатьев // Гироскопия и навигация. – 2005. - № 1. - С. 22-29.
10. **Игнатьев, С.В.** Синтез алгоритма управления модуляционным вращением измерительного блока инерциально-спутниковой системы / С.В.Игнатьев [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 3.- С. 62-67.

Abstract. The paper outlines the method for calibration of a strapdown inertial measurement unit (SIMU) based on fiber-optic gyros (FOG) in dynamic conditions on a test bed. Calculated components of linear velocity vector and position of SIMU accelerometer unit on the test bed platform are used as a reference.

The accuracy of a proposed method is estimated by testing the SIMU based on FOGs by IXSEA (France) on three-axis rate table by Acutronic.

Key words: fiber optic gyros, calculated data on vector components, estimated calibration accuracy

Материал поступил 22.02.12