
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05

С. Г. НИКОЛАЕВ

КАЛИБРОВКА БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается способ определения калибровочных коэффициентов с использованием математической модели ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Предложенный способ основан на осуществлении с помощью калибровочного стола последовательности поворотов системы в требуемые фиксированные положения с последующим вычислением калибровочных коэффициентов.

Ключевые слова: навигационная система, инерциальная навигация, калибровочный коэффициент, модель ошибки.

Обеспечение высокоточной калибровки является одним из основных условий построения прецизионных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Калибровка заключается в определении систематических погрешностей инерциальных измерителей (гироскопов и акселерометров). Публикации, посвященные калибровке БИНС, практически отсутствуют. В некоторых работах (см., например, [1, 2]) содержатся лишь самые общие сведения по этим вопросам, что не позволяет воспроизвести сам процесс калибровки. В отечественной приборной промышленности используются два основных способа калибровки: по показаниям инерциальных измерителей и с использованием метода уточнения значений калибровочных коэффициентов.

Идея использования математической модели ошибок БИНС при калибровке заключается в нахождении способа, с помощью которого по измеренным выходным сигналам системы можно определить калибровочные коэффициенты инерциальных измерителей [3]. Реализация такого способа стала возможной с появлением калибровочных наклонно-поворотных столов (НПС), которые определяют ориентацию БИНС с точностью до 2—3".

Сущность этого способа заключается в том, что БИНС устанавливаются на двухосном калибровочном НПС, который задает требуемые фиксированные положения системы. Эти положения БИНС определяются структурой моделей ошибок измерителей. В процессе калибровки на первом этапе оценивается вектор ошибок системы. Вектор ошибок двухканальной БИНС содержит следующие составляющие: ошибки измерения углов ориентации (курса, тангажа и крена), ошибки определения составляющих линейной скорости в северном и восточном направлениях, ошибки измерения широты и долготы. Значения составляющих вектора ошибок системы приравниваются к их аналитическим аналогам, полученным путем решения математической модели ошибок БИНС. Далее для момента времени t формируется система алгебраических уравнений для определения входных сигналов модели ошибок БИНС.

На втором этапе по полученным алгебраическим уравнениям определяются калибровочные коэффициенты инерциальных измерителей.

Предлагаемый способ позволяет увеличить точность определения калибровочных коэффициентов благодаря тому, что калибровка осуществляется в автономном режиме работы БИНС. Кроме того, выходные сигналы БИНС имеют значительно более низкую зашумленность, чем сигналы инерциальных измерителей. Для автономного режима работы системы в качестве первого приближения значений калибровочных коэффициентов акселерометров и гироскопов можно принять коэффициенты, определенные в процессе изготовления инерциальных измерителей.

Рассмотрим возможность реализации предлагаемого способа калибровки на примере двухканальной БИНС на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ), модель ошибок которых имеет следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega_{nx} \\ \omega_{ny} \\ \omega_{nz} \end{vmatrix} + \left| \Delta k_d + \delta A_b^d \right| \cdot \begin{vmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{dx} \\ n_{dy} \\ n_{dz} \end{vmatrix},$$

где $|n_{dx} \ n_{dy} \ n_{dz}|^T$ — векторы шумов ВОГ; ω_{ni} — ошибки „смещения“ нуля ВОГ; δA_b^d — матрица углов перекосов осей чувствительности ВОГ; ω_{xyz} — проекции угловой скорости суточного вращения Земли; Δk_d — диагональная матрица масштабных коэффициентов ВОГ.

Модель ошибок акселерометров БИНС запишем в виде

$$\begin{vmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f_{nx} \\ f_{ny} \\ f_{nz} \end{vmatrix} + \left| \Delta k_a + \delta A_b^a \right| \cdot \begin{vmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{vmatrix},$$

где f_{ni} — ошибки „смещения“ нуля акселерометров; δA_b^a — матрица углов перекосов осей чувствительности акселерометров; f_{xyz} — проекции ускорения силы тяжести; $|n_{ax} \ n_{ay} \ n_{az}|^T$ — векторы шумов акселерометров; Δk_a — диагональная матрица масштабных коэффициентов акселерометров.

Структурная схема, иллюстрирующая способ калибровки БИНС с использованием математической модели ошибок системы, представлена на рисунке. На схеме БИНС представлена блоком 1, калибровочный наклонно-поворотный стол — блоком 2. В блоке 3 определяются векторы ошибок $\delta\omega_j(i)$, $\delta f_j(i)$ ВОГ и акселерометров в соответствии с i -й ориентацией калибровочного НПС. В блоке 4 формируются математические модели ошибок системы при i -й ориентации НПС и их аналитические решения $\delta V_n(i)$, $\delta\vartheta(i)$, $\delta\psi(i)$, $\delta V_e(i)$, $\delta\gamma(i)$, $\delta\varphi(i)$, а в блоке 5 — алгоритмы вычисления калибровочных коэффициентов инерциальных измерителей.

Калибровочные коэффициенты определяются в два этапа. На *первом этапе* формируются алгебраические уравнения

$$\delta V_n(i) = \delta \tilde{V}_n(i); \quad \delta\vartheta(i) = \delta \tilde{\vartheta}(i); \quad \delta V_e(i) = \delta \tilde{V}_e(i); \quad \delta\gamma(i) = \delta \tilde{\gamma}(i) \quad (1)$$

для определения входных сигналов $\delta\omega_n(i)$, $\delta f_n(i)$ и $\delta\omega_e(i)$, $\delta f_e(i)$ модели ошибок соответственно северного (индекс „n“ — north) и восточного (индекс „e“ — east) каналов БИНС.

Из уравнений (1) получим

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta V}_n &= g\delta\vartheta + \delta f_n; \\ \dot{\delta\vartheta} &= -\frac{\delta V_n}{R} + \delta\omega_n; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

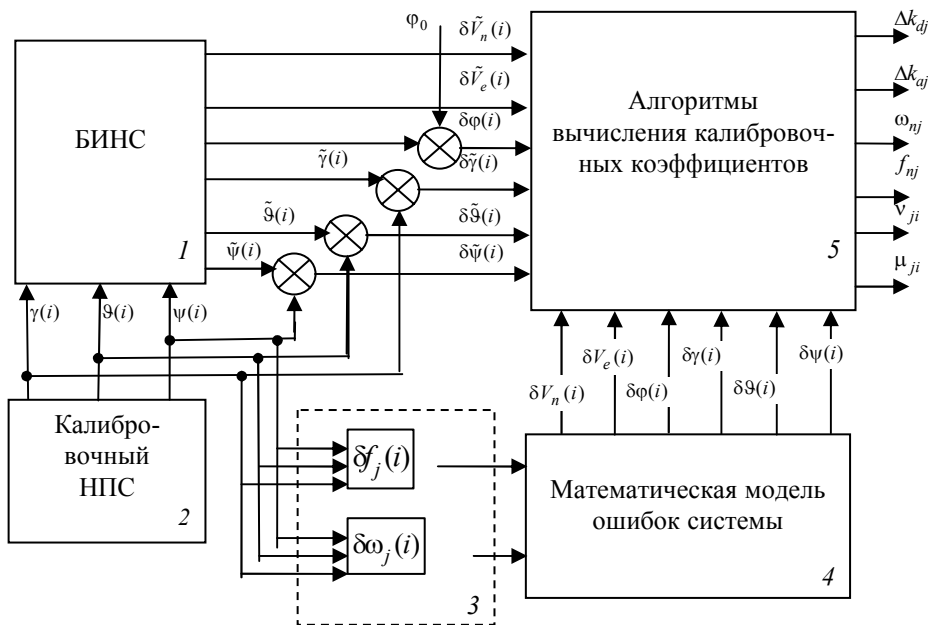
$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta V}_e &= -g\delta\gamma + \delta f_e; \\ \dot{\delta\gamma} &= \frac{\delta V_e}{R} + \delta\omega_e; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R — радиус Земли.

Системы дифференциальных уравнений (2) и (3) описывают ошибки северного и восточного каналов БИНС. Они получены без учета влияния перекрестных связей между каналами. Учет этих связей может привести к появлению членов, определяющих суточные колебания с периодом, близким к 24 ч. В этом случае аналитические решения систем (2) и (3) включают только колебания с периодом 84,4 мин (частота этих колебаний $\omega_s = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$):

$$\left. \begin{aligned} \delta V_n &= \frac{g\delta\omega_n}{\omega_s^2} (1 - \cos \omega_s t) + \frac{\delta f_n}{\omega_s} \sin \omega_s t; \\ \delta\vartheta &= \frac{\delta\omega_n}{\omega_s} \sin \omega_s t - \frac{\delta f_n}{R\omega_s^2} (1 - \cos \omega_s t); \\ \delta V_e &= -\frac{g\delta\omega_e}{\omega_s^2} (1 - \cos \omega_s t) + \frac{\delta f_e}{\omega_s} \sin \omega_s t; \\ \delta\gamma &= \frac{\delta\omega_e}{\omega_s} \sin \omega_s t + \frac{\delta f_e}{R\omega_s^2} (1 - \cos \omega_s t). \end{aligned} \right\}$$

Эти упрощения основаны на том, что при калибровке время работы БИНС при каждой из ориентаций калибровочного НПС не превышает 2—3 мин.



Уравнения (1) для i -й ориентации калибровочного НПС можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{g\delta\omega_n(i)}{\omega_s^2}(1-\cos\omega_s t) + \frac{\delta f_n(i)}{\omega_s} \sin\omega_s t &= \delta\tilde{V}_n(i); \\ \frac{\delta\omega_n(i)}{\omega_s} \sin\omega_s t - \frac{\delta f_n(i)}{R\omega_s^2}(1-\cos\omega_s t) &= \delta\tilde{\vartheta}(i); \\ -\frac{g\delta\omega_e(i)}{\omega_s^2}(1-\cos\omega_s t) + \frac{\delta f_e(i)}{\omega_s} \sin\omega_s t &= \delta\tilde{V}_e(i); \\ \frac{\delta\omega_e(i)}{\omega_s} \sin\omega_s t + \frac{\delta f_e(i)}{R\omega_s^2}(1-\cos\omega_s t) &= \delta\tilde{\gamma}(i), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь коэффициенты $\sin\omega_s t$, $1-\cos\omega_s t$ имеют конкретные числовые значения в моменты времени $t = \Delta t l$, $l=0, 1, 2, \dots$

Решив уравнения (4), получим выражения для входных сигналов модели ошибок БИНС:

$$\left. \begin{aligned} \delta\tilde{f}_n(i) &= -0,5g\delta\tilde{\vartheta}(i) + \frac{\omega_s \sin\omega_s t}{2(1-\cos\omega_s t)} \delta\tilde{V}_n(i); \\ \delta\tilde{\omega}_n(i) &= \frac{\omega_s \sin\omega_s t}{2(1-\cos\omega_s t)} \delta\tilde{\vartheta}(i) + \frac{1}{2R} \delta\tilde{V}_n(i); \\ \delta\tilde{f}_e(i) &= 0,5g\delta\tilde{\gamma}(i) + \frac{\omega_s \sin\omega_s t}{2(1-\cos\omega_s t)} \delta\tilde{V}_e(i), \\ \delta\tilde{\omega}_e(i) &= \frac{\omega_s \sin\omega_s t}{2(1-\cos\omega_s t)} \delta\tilde{\gamma}(i) - \frac{1}{2R} \delta\tilde{V}_e(i). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Определением входных сигналов модели ошибок БИНС заканчивается первый этап.

На *втором этапе* по выражениям (5) определяем значения калибровочных коэффициентов инерциальных измерителей:

$$\left. \begin{aligned} \sum \omega_j(i) &= \sum \tilde{\omega}_j(i); \\ \sum f_j(i) &= \sum \tilde{f}_j(i); \end{aligned} \right\} \quad j=n, e. \quad (6)$$

Левые части уравнений (6) представляют собой алгебраические суммы аналитических входных сигналов модели ошибок БИНС, они определяются по моделям ошибок инерциальных измерителей для заданных ориентаций калибровочного НПС; правые части уравнений (6) содержат алгебраические суммы рассчитанных входных сигналов для тех же ориентаций.

Рассмотрим восемь ориентаций калибровочного НПС относительно системы координат с географической ориентацией осей в соответствии с таблицей.

Номер ориентации	ψ, \dots°	ϑ, \dots°	γ, \dots°
1	0	0	45
2	90	45	0
3	180	0	315
4	270	315	0
5	0	0	225
6	90	45	180
7	180	0	135
8	90	225	0

Определим калибровочные коэффициенты ВОГ, установленного вдоль продольной оси OX . Сформируем четыре алгебраических уравнения (по числу неизвестных калибровочных коэффициентов) в соответствии с первым уравнением системы (6):

$$\left. \begin{aligned} 2\omega_{nx} - \sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi \cdot v_{xy} &= \delta\tilde{\omega}_e(7) - \delta\tilde{\omega}_e(5); \\ 2\omega_{nx} + \sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi \cdot v_{xy} &= \delta\tilde{\omega}_e(3) - \delta\tilde{\omega}_e(1); \\ -\sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi \cdot v_{xz} - 2\Omega \cos \varphi \cdot \Delta k_{dx} &= \sum_{i=1,3} \delta\tilde{\omega}_e(i); \\ \sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi \cdot v_{xz} - 2\Omega \cos \varphi \cdot \Delta k_{dx} &= \sum_{i=5,7} \delta\tilde{\omega}_e(i), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где v_{xy} , v_{xz} — углы перекосов оси чувствительности ВОГ.

Решив систему (7), получим выражения для определения калибровочных коэффициентов ВОГ, установленного вдоль оси OX :

$$\begin{aligned} \Delta k_{dx} &= -\frac{1}{4} \sum_{i=1,3,5,7} \delta\tilde{\omega}_e(i); \\ \omega_{nx} &= \frac{1}{4} \left[\sum_{i=3,7} \delta\tilde{\omega}_e(i) - \sum_{i=1,5} \delta\tilde{\omega}_e(i) \right]; \\ v_{xy} &= \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi} \left[\sum_{i=3,5} \delta\tilde{\omega}_e(i) - \sum_{i=1,7} \delta\tilde{\omega}_e(i) \right], \\ v_{xz} &= \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot \Omega \sin \varphi} \left[\sum_{i=5,7} \delta\tilde{\omega}_e(i) - \sum_{i=1,3} \delta\tilde{\omega}_e(i) \right]. \end{aligned}$$

Калибровочные коэффициенты волоконно-оптических гироскопов, установленных вдоль других осей, определяются аналогичным образом.

Определение калибровочных коэффициентов акселерометров осуществляется по этой же методике с использованием второго уравнения системы (6). Так, калибровочные коэффициенты акселерометра, установленного вдоль оси OX , определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} f_{nx} &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1,5} \delta\tilde{f}_n(i); \quad \mu_{xy} = \frac{\sqrt{2}}{2g} \sum_{i=1,7} \delta\tilde{f}_n(i); \quad \mu_{xz} = -\frac{\sqrt{2}}{2g} \sum_{i=5,7} \delta\tilde{f}_n(i); \\ \Delta k_{ax} &= \frac{1}{2g} \left[\sum_{i=1,3,5,7} \delta\tilde{f}_e(i) - \sum_{i=1}^8 \delta\tilde{f}_e(i) + \frac{2}{\sqrt{2}} (\delta f_y(1) - \delta f_y(7)) \right], \end{aligned}$$

где μ_{xy} , μ_{xz} — углы перекосов оси чувствительности акселерометра.

Калибровочные коэффициенты акселерометров, установленных вдоль осей OY и OZ , определяются аналогичным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savage P. Introduction to Strapdown Inertial Navigation Systems. Strapdown Associates, 1981.
2. Brown A., Ebner R., Mark J. A calibration technique for a laser gyro strapdown inertial navigation system // DGON Proc. Gyro Technology Symposium. Stuttgart, 1982.
3. Николаев С. Г. Калибровка БИНС с использованием модели ошибок системы: Реферат докл. на XXV науч.-техн. конф. памяти Н. Н. Острякова, Санкт-Петербург, 10—12 окт. 2006 // Гироскопия и навигация. 2006. № 4(55). С. 90.

Сведения об авторе

Станислав Георгиевич Николаев — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов

Рекомендована кафедрой
измерительно-вычислительных
комплексов летательных аппаратов

Поступила в редакцию
28.05.08 г.