

Д. В. ВОЛЫНСКИЙ, Е. В. ДРАНИЦЫНА, А. А. ОДИНЦОВ, А. А. УНТИЛОВ

КАЛИБРОВКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ В СОСТАВЕ БЕСКАРДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Рассматриваются вопросы калибровки волоконно-оптических гироскопов с линейной характеристикой коррекции в составе бескарданных инерциальных измерительных модулей различной конструкции в стендовых условиях. Оцениваются требования к точности калибровки и требования к стендовому оборудованию.

Введение

При построении бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) вопросы калибровки гироскопов имеют особую важность, поскольку требования к точности определения их масштабных коэффициентов и углов ориентации измерительных осей по отношению к приборным осям БИНС существенно выше, чем для карданных систем. На практике калибровка чувствительных элементов производится, как правило, в составе бескарданного инерциального измерительного модуля (БИИМ). Это объясняется тем, что требуется определение ориентации измерительных осей чувствительных элементов относительно приборных осей БИИМ в условиях конкретного прибора. Кроме того, учет помех, создаваемых монтажом и системой питания, может повлиять на точность калибровки.

В общем случае калибровка датчиков угловой скорости в составе БИИМ заключается в нахождении параметров калибровки – числовых констант, характеризующих модель погрешностей их выходного сигнала. Калибровку датчиков угловой скорости можно разделить на два этапа. Первый этап – калибровка при постоянной температуре, которая включает в себя определение смещений нулей, масштабных коэффициентов и ортогонализации и привязки трехгранника, образованного осями чувствительности датчиков угловой скорости, относительно приборной системы координат БИИМ. Второй этап калибровки включает в себя оценку систематических погрешностей датчиков угловой скорости относительно их калибровочных значений, вызванных изменением температуры внутри БИИМ [1–3].

В свою очередь, калибровку при постоянной температуре в зависимости от вида данных, используемых в качестве эталонной информации, можно разделить на два типа:

калибровка с использованием данных об угловой скорости или угловом положении платформы стенда [4, 5];

Волынский Денис Валерьевич. Начальник отдела гироскопических приборов ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

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

Одинцов Александр Анатольевич (1937-2010). Доктор технических наук, профессор.

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, заместитель начальника отдела гироскопических приборов «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых Академии навигации и управления движением.

калибровка с использованием составляющих вектора линейной скорости и (или) географических координат точки установки БИИМ на платформе стенда [6–8].

В настоящей работе рассматриваются вопросы калибровки прецизионных волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), построенных по схеме с обратной связью, выходные характеристики которых линейны, а неучтенный уход составляет не более $0,01^\circ/\text{ч}$, при постоянной температуре с использованием в качестве эталонной информации данных об угловом положении платформы стенда.

Цель настоящей статьи – выработка требований к точности определения калибруемых параметров; определение требований к стендовому оборудованию; разработка методики калибровки, удовлетворяющей разработанным требованиям. Вопросы калибровки рассматриваются применительно к морским БИНС, хотя большинство полученных результатов применимо и для других областей.

В данной статье определяются следующие константы, характеризующие модель погрешностей ВОГ [9]:

g_{0x}, g_{0y}, g_{0z} – нулевые смещения сигналов ВОГ;

M_{gx}, M_{gy}, M_{gz} – масштабные коэффициенты сигналов ВОГ;

$\alpha_{yx}, \alpha_{zx}, \beta_{xy}, \beta_{zy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – углы отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ – $OX_g Y_g Z_g$; первый индекс обозначает измерительную ось, второй – ось, вокруг которой произведен поворот этой измерительной оси. Положительным считается угол, отсчитываемый против часовой стрелки, смотря с положительного конца соответствующей оси.

Требования к точности калибровки

Точность калибруемых параметров ВОГ должна быть не хуже неучтенного ухода гироскопов при реальных условиях эксплуатации БИНС, т.е. при реальных угловых скоростях создаваемых качкой, рысканием и изменением курса объекта.

Для БИНС, как и для любой инерциальной навигационной системы, чрезвычайно важно сведение к минимуму медленноменяющихся неучтенных уходов гироскопов, поскольку именно они и создают накапливающиеся погрешности выработки выходных параметров системы. Для датчиков угловых скоростей мерой такой погрешности является асимметрия масштабного коэффициента, а также погрешность определения масштабного коэффициента и углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ. В условиях знакопеременной угловой скорости

качки и рыскания асимметрия масштабного коэффициента вызывает постоянную скорость ухода. Погрешность определения масштабного коэффициента и углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ вызывает постоянную скорость ухода во время циркуляции.

Нестабильность нулевых смещений ВОГ определяет неучтенный уход гироскопа. Поскольку при калибровке нулевые смещения ВОГ определяются простым осреднением, то их точность будет всегда несколько выше неучтенного ухода гироскопа. Кроме того, нулевые смещения гироскопов, как правило, определяются в процессе каждого запуска БИНС на объекте.

Асимметрию масштабного коэффициента ВОГ определим следующим образом:

$$\Delta M_{gj} = \frac{M_{gj}^+ - M_{gj}^-}{(M_{gj}^+ + M_{gj}^-) / 2}, \quad (1)$$

где ΔM_{gj} – асимметрия масштабного коэффициента ВОГ; $j = x, y, z$; M_{gj}^+ , M_{gj}^- – масштабные коэффициенты ВОГ при измерении ими положительной и отрицательной скорости объекта.

Скорость неучтенного дрейфа, вызываемую гармонической качкой объекта, можно оценить по формуле

$$\dot{\delta}_j = \Delta M_{gj} A_\omega \frac{2}{\pi}, \quad (2)$$

где A_ω – амплитуда угловой скорости качки.

Для морских БИНС, используемых на надводных объектах, диапазон угловых скоростей может достигать $30^\circ/\text{с}$ или $\sim 10^5$ $^\circ/\text{ч}$, что соответствует качке с амплитудой 30° и периодом 6 с. Подставляя указанные числовые данные и задаваясь точностью ВОГ $0,01^\circ/\text{ч}$, получаем чрезвычайно высокие требования к асимметрии масштабного коэффициента ВОГ $\Delta M_{gj} \approx (1 - 2) \cdot 10^{-7}$.

Поэтому для повышения точности целесообразно определять масштабный коэффициент ВОГ отдельно для положительного и отрицательного значений угловой скорости и учитывать эти значения в алгоритме БИНС.

Погрешность определения масштабного коэффициента, кроме его асимметрии, характеризуется еще и ошибкой его определения. Задаваясь угловой скоростью циркуляции ($\dot{K} = 3-6^\circ/\text{с}$), нетрудно подсчитать, что относительная погрешность определения масштабного коэффициента составляет $\sim 1 \cdot 10^{-6}$.

Неточность определения углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ вызывает погрешность измерения скорости по рассматриваемой координате за счет измерения скорости по перекрестным координатам и может быть найдена по аналогии с масштабным коэффициентом и составлять $1 - 3''$.

Требования к стендовому оборудованию

Очевидно, что точность задаваемой стендом скорости должна быть, по крайней мере, в 3–5 раз выше, чем неучтенный уход калибруемых ВОГ, т.е. в рассматриваемом случае находиться на уровне $\sim 0,002^\circ/\text{ч}$, во всем диапазоне угловых скоростей от -30 до $+30^\circ/\text{с}$, что является нереальным даже для самых прецизионных стендов. Поэтому в предлагаемой калибровке вместо угловой скорости следует использовать угол, измеренный за большое количество целых оборотов, что обеспечит необходимую точность определения масштабных коэффициентов.

Поскольку координаты стенда известны с высокой точностью, то вопрос привязки стенда к географической системе координат сводится к выставке платформы стенда в плоскость горизонта и определению его азимута. Ошибка выставки стенда в плоскость горизонта, как правило, не превышает нескольких угловых секунд. Нетрудно подсчитать, что погрешность выставки в азимут не должна превышать $20 - 30''$, при этом ошибка в определении угловой скорости не превысит значения $0,002$ $^\circ/\text{ч}$.

Ошибка привязки осей прибора к осям стенда не должна превышать точность определения углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ, т. е. составлять примерно $1-3''$. Это же относится и к погрешности списывания углов датчиками стенда, которая не должна превышать $1-3''$.

Методика калибровки

Для удобства дальнейшего изложения введем следующие правые ортогональные системы координат с общим началом в центре масс БИИМ:

- $OENH$ – географически ориентированный горизонтный трехгранник;
- $OX_0Y_0Z_0$ – трехгранник, жестко связанный с корпусом БИИМ (X_0 и Y_0 параллельны посадочной плоскости прибора, Z_0 направлена перпендикулярно посадочной плоскости вверх);
- $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ – трехгранник жестко связанный с конструктивными направлениями измерительных осей ВОГ;
- $OX_{B}Y_{B}Z_{B}$ – система координат, жестко связанная с блоком гироскопов (ось Z_{B} – ось вращения блока, направлена вверх).

Введем также правую неортогональную систему координат, оси которой направлены по измерительным осям гироскопов $OX_gY_gZ_g$ соответственно.

На рис. 1–3 показано взаимное расположение трехгранников $OX_0Y_0Z_0$ и $OX_gY_gZ_g, OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}; OX_{B}Y_{B}Z_{B}$ для трех видов БИИМ, рассматриваемых в работе.

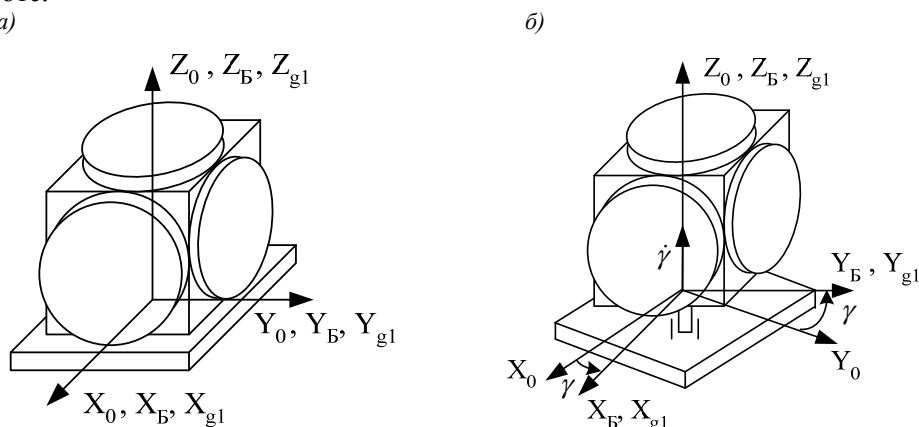


Рис. 1. Системы координат для первого (а) и второго (б) типа БИИМ

Первый тип БИИМ, в котором отсутствует система автокомпенсации уходов, а система координат $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ совпадает с $OX_0Y_0Z_0$ (рис. 1).

Во втором типе имеется система автокомпенсационного вращения, которая вращает блок с гироскопами вокруг вертикальной оси Z_0 , совпадающей с осью Z_{B} (рис. 2). Отметим, что система координат $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ совпадает с $OX_{B}Y_{B}Z_{B}$.

Рассмотрим теперь ориентацию осей в третьем типе БИИМ. Измерительные оси трех ВОГ номинально расположены перпендикулярно трем граням тре-

угольной пирамиды, которая вращается относительно корпуса БИИМ вокруг оси, соединяющей ее вершину с основанием, т.е. вокруг оси Z_B (рис. 2).

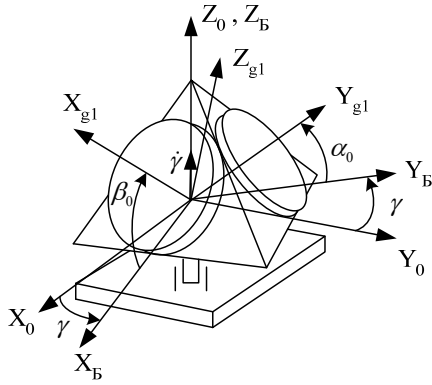


Рис. 2. Системы координат для третьего типа БИИМ

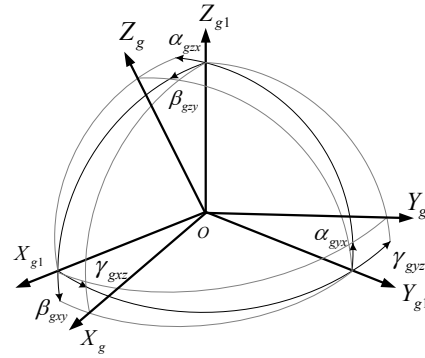


Рис. 3. Ориентация системы координат $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ и $OX_gY_gZ_g$

Переходная матрица между трехгранниками $OX_B Y_B Z_B$ и $OX_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$ очевидно имеет вид:

$$\begin{bmatrix} X_{g1} & Y_{g1} & Z_{g1} \end{bmatrix}^T = B \begin{bmatrix} X_B & Y_B & Z_B \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

где
$$B = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & -\sin \beta_0 \sin \alpha_0 & \sin \beta_0 \cos \alpha_0 \\ 0 & \cos \alpha_0 & \sin \alpha_0 \\ -\sin \beta_0 & -\cos \beta_0 \sin \alpha_0 & \cos \beta_0 \cos \alpha_0 \end{bmatrix}.$$

Переходная матрица между трехгранниками $OX_B Y_B Z_B$ и $OX_0 Y_0 Z_0$ легко находится из рис. 1, а:

$$\begin{bmatrix} X_B & Y_B & Z_B \end{bmatrix}^T = C \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

где
$$C = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$
 γ – угол разворота блока с гироскопами относительно корпуса прибора БИИМ второго и третьего типов.

Из выражений (3) и (4) находим переходную матрицу между системами координат $OX_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$ и $OX_0 Y_0 Z_0$

$$\begin{bmatrix} X_{g1} & Y_{g1} & Z_{g1} \end{bmatrix}^T = BC \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

Ориентация осей $OX_g Y_g Z_g$ относительно осей $OX_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$ приведена на рис. 2. Матрица направляющих косинусов между ортогональной системой координат $OX_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$ и неортогональным трехгранником $OX_g Y_g Z_g$ обозначим A_g

$$\begin{bmatrix} X_g & Y_g & Z_g \end{bmatrix}^T = A_g \begin{bmatrix} X_{g1} & Y_{g1} & Z_{g1} \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

где

$$A_g = \begin{vmatrix} \cos\beta_{xy} \cos\gamma_{xz} & \sin\gamma_{xz} \cos\beta_{xy} & -\sin\beta_{xy} \cos\gamma_{xz} \\ -\sin\gamma_{yz} \cos\alpha_{yx} & \cos\alpha_{yx} \cos\gamma_{yz} & \sin\alpha_{yx} \cos\gamma_{yz} \\ \sin\beta_{zy} \cos\alpha_{zx} & -\sin\alpha_{zx} \cos\beta_{zy} & \cos\alpha_{zx} \cos\beta_{zy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{vmatrix}.$$

Для перемножения неортогональной матрицы A_g на ортогональные матрицы, матрица A_g может быть заменена тремя матрицами для трех ортогональных трехгранников, связанных с измерительными осями гироскопов [10].

Поскольку требуется высокая точность калибровки гироскопов, то процедура калибровки ВОГ целесообразно провести в три этапа. На первом этапе определяются нулевые смещения ВОГ. На втором – производится замер выходных показаний ВОГ при задании вращающемуся стенду фиксированных скоростей $\dot{\alpha}_c$ и $\dot{\gamma}_c$. Третий этап калибровки заключается в нахождении второго приближения полученных величин масштабных коэффициентов и углов ориентации измерительных осей ВОГ.

Калибровка трех типов БИИМ рассматривается применительно к трехосному стенду Acutrol 3000 фирмы Acutronic. Неортогональность осей менее 6". Точность позиционирования платформы стенда составляет 3". Стабильность задания угловой скорости 0,0005%. Схема расположения осей стенда приведена на рис. 4.

Введем обозначения для углов разворота стенда вокруг его осей:

- вокруг внешней (ось 3) γ_{c1} ;
- вокруг промежуточной (ось 2) α_c ;
- вокруг внутренней (ось 1) γ_c .

В исходном положении стенд выставляется таким образом, чтобы промежуточная ось стенда совпадала с осью E , направленной на восток. Прибор устанавливается на платформу стенда так, чтобы при нулевых отсчетах осей стенда система координат $OX_0Y_0Z_0$ совпадала с географическим трехгранником $OENH$.

В работе рассматриваются два способа определения нулевых смещений ВОГ.

Первый способ основан на последовательной установке осей БИИМ $OX_0Y_0Z_0$ в четыре положения, отстоящих друг от друга на 180° , причем ориентация осей БИИМ относительно географического трехгранника $OENH$ может быть произвольной, первый и третий поворот производятся вокруг вертикальной оси, а второй вокруг горизонтальной. В каждом из указанных положений определение угловых скоростей, вырабатываемых ВОГ, производится на вращающемся стенде за некоторое время, например за 1 ч.

Рассмотрим исходные соотношения для первого типа БИИМ, соответствующие положению, когда оси X_0 и Y_0 лежат в плоскости горизонта с произвольным курсом. Поскольку для первого типа БИИМ трехгранник $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ совпадает с приборными осями $OX_0Y_0Z_0$, то с учетом матрицы (6) для оси X_0 имеем:

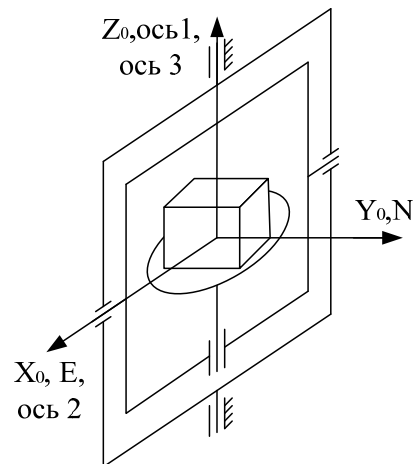


Рис. 4. Схема взаимного расположения осей стенда и БИИМ

$$\begin{aligned}
 p_1 &= g_{0x} - C_{xx}\Omega \cos \varphi \sin K + C_{xy}\Omega \cos \varphi \cos K + C_{xz}\Omega \sin \varphi; \\
 p_2 &= g_{0x} + C_{xx}\Omega \cos \varphi \sin K - C_{xy}\Omega \cos \varphi \cos K + C_{xz}\Omega \sin \varphi; \\
 p_3 &= g_{0x} + C_{xx}\Omega \cos \varphi \sin K + C_{xy}\Omega \cos \varphi \cos K - C_{xz}\Omega \sin \varphi; \\
 p_4 &= g_{0x} - C_{xx}\Omega \cos \varphi \sin K - C_{xy}\Omega \cos \varphi \cos K - C_{xz}\Omega \sin \varphi,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где p_1, p_2, p_3, p_4 – осредненные показания ВОГ, измерительная ось которого направлена по X_g ; Ω – скорость вращения Земли; φ – широта места расположения станда; K – курс прибора БИИМ.

Из (7) следует

$$g_{0x} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4}. \tag{8}$$

Аналогично определяются нулевые смещения для осей Y_0 и Z_0 .

Отметим, что знания масштабного коэффициента ВОГ для определения нулевых смещений ВОГ при этом не требуется.

Второй способ является следствием первого и основан на последовательном совмещении осей прибора X_0, Y_0 и Z_0 с осью N , направленной на север, и последующем одном развороте каждой из осей на юг вокруг горизонтальной оси.

Для первого типа БИИМ исходные соотношения, соответствующие положениям позиционирования оси X_0 на север и юг, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= g_{0x} + C_{xx}\Omega \cos \varphi + C_{xz}\Omega \sin \varphi; \\
 q_2 &= g_{0x} - C_{xx}\Omega \cos \varphi - C_{xz}\Omega \sin \varphi.
 \end{aligned} \tag{9}$$

А смещение нуля ВОГ можно найти по формуле

$$g_{0y} = \frac{q_1 + q_2}{2}. \tag{10}$$

Возможность только одного поворота объясняется тем, что проекция угловой скорости вращения Земли на линию восток–запад равна нулю.

Аналогично определяются нулевые смещения для осей Y_0 и Z_0 .

Для нахождения масштабных коэффициентов и углов отклонения измерительных осей от приборного трехгранника необходимо произвести последовательные вращения вокруг приборных осей X_0, Y_0, Z_0 по и против часовой стрелки с различными скоростями, покрывающими необходимый диапазон. При этом оси X_0 и Y_0 ориентируются на восток, вращение производится 2-й осью станда, а ось Z_0 ориентируется вертикально, вращение производится 3-й осью станда. Регистрация измеряемой гироскопами угловой скорости производится в течение определенного времени T на каждой скорости.

Если отсчеты снимать строго за целое число оборотов станда, составляющие измеряемой угловой скорости, модулируемые на частоте вращения, обращаются в ноль, что значительно упростит вычисления. С учетом этого обстоятельства и зная смещения нулей ВОГ, можно записать соотношения:

$$\begin{aligned}
 M_{gj}(\bar{\omega}_{gj} - g_{0j}) &= C_{jx}\dot{\alpha}_c; & M_{gj}(\bar{\omega}_{gj} - g_{0j}) &= C_{jy}\dot{\alpha}_c; \\
 M_{gj}(\bar{\omega}_{gj} - g_{0j}) &= C_{jz}(\dot{\gamma}_c + \Omega \sin \varphi),
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $j = x, y, z$; $\bar{\omega}_{gj}$ – осредненные за некоторое время T значения угловой скорости, измеряемые соответствующим ВОГ.

Учитывая малость углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей ($< 5'$), в первом приближении (с точностью до 10^{-6}) можно положить

$$C_{xx} \approx C_{yy} \approx C_{zz} \approx 1. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) можно записать:

$$M'_{gx} = \frac{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)}{T \int_0^T (\omega_{gx} - g_{0x}) dt}; \quad M'_{gy} = \frac{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)}{T \int_0^T (\omega_{gy} - g_{0y}) dt};$$

$$M'_{gz} = \frac{\gamma_c(T) - \gamma_c(0) + U \sin \varphi T}{T \int_0^T (\omega_{gz} - g_{0z}) dt}, \quad (13)$$

где $M'_{gx}, M'_{gy}, M'_{gz}$ – первое приближение масштабных коэффициентов ВОГ; $\alpha_c(0), \gamma_c(0), \alpha_c(T), \gamma_c(T)$ – начальные и конечные значения углов поворота стенда, соответствующие интервалу определения масштабных коэффициентов и углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей БИИМ.

Как уже отмечалось, масштабные коэффициенты могут иметь различные значения в зависимости от знака скорости. В дальнейшем будем обозначать их как M_{gk}^+ и M_{gk}^- ($k = x, y, z$) при положительной и отрицательной скоростях.

Учитывая линейность выходной характеристики ВОГ, целесообразно определять масштабные коэффициенты при скоростях вращения стенда, приближающихся к максимальным угловым скоростям вращения объекта. Из выражений (11) с учетом (13) находим первые приближения коэффициентов C'_{ij} :

$$C'_{ix} = \frac{M'_{gi} \int_0^T (\omega_{gi} - g_{0i}) dt}{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)}; \quad C'_{iy} = \frac{M'_{gj} \int_0^T (\omega_{gj} - g_{0j}) dt}{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)};$$

$$C'_{kz} = \frac{M'_{gk} \int_0^T (\omega_{gk} - g_{0k}) dt}{\gamma_c(T) - \gamma_c(0) + \Omega \sin \varphi T}, \quad (14)$$

где $i = y, z; j = x, z; k = x, y$.

Третий этап калибровки сводится к получению второго приближения величин масштабов и углов отклонения измерительных осей от приборного трехгранника.

Нетрудно показать, что при максимальных углах отклонения измерительных осей ВОГ от приборных, составляющих не более $5''$, можно заменить значения элементов матрицы A_g , входящей в (6), следующими выражениями:

$$\cos \alpha \cos \beta \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\beta^2}{2}; \quad \sin \alpha \cos \beta \approx 1 - \frac{\alpha^3}{2} - \frac{\alpha \beta^2}{2}, \quad (15)$$

при этом ошибка для первого выражения не будет превышать $3 \cdot 10^{-13}$, а для второго 10^{-15} , причем квадратные члены в первом выражении имеют порядок $2 \cdot 10^{-6}$, а кубические члены во втором выражении 10^{-9} .

Второе приближение для масштабных коэффициентов вместо (13) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 M_{gx} &= \frac{[\alpha_c(T) - \alpha_c(0)] \left[1 - \frac{C'_{xy}{}^2}{2} - \frac{C'_{xz}{}^2}{2} \right]}{T \int_0^T (\omega_{gx} - g_{0x}) dt}; \\
 M_{gy} &= \frac{[\alpha_c(T) - \alpha_c(0)] \left[1 - \frac{C'_{yx}{}^2}{2} - \frac{C'_{yz}{}^2}{2} \right]}{T \int_0^T (\omega_{gy} - g_{0y}) dt}; \\
 M_{gz} &= \frac{[\gamma_c(T) - \gamma_c(0) + \Omega \sin \varphi T] \left[1 - \frac{C'_{zx}{}^2}{2} - \frac{C'_{zy}{}^2}{2} \right]}{T \int_0^T (\omega_{gz} - g_{0z}) dt},
 \end{aligned} \tag{16}$$

где $C'_{xy}, C'_{xz}, C'_{yx}, C'_{yz}, C'_{zx}, C'_{zy}$ – определяются соотношениями (14).

Приведенные числовые оценки (15) показывают, что второго приближения для масштабных коэффициентов вполне достаточно.

Второе приближение для угловых величин «С» получается из выражений (4), если в них заменить $M'_{gx}, M'_{gy}, M'_{gz}$ на M_{gx}, M_{gy}, M_{gz} из выражений (16):

$$\begin{aligned}
 C_{ix} &= \frac{M_{gi} \int_0^T (\omega_{gi} - g_{0i}) dt}{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)}; \quad C_{jy} = \frac{M_{gj} \int_0^T (\omega_{gj} - g_{0j}) dt}{\alpha_c(T) - \alpha_c(0)}; \\
 C_{kz} &= \frac{M_{gk} \int_0^T (\omega_{gk} - g_{0k}) dt}{\gamma_c(T) - \gamma_c(0) + \Omega \sin \varphi T},
 \end{aligned} \tag{17}$$

где $i = y, z; j = x, z; k = x, y$.

Перейдем к рассмотрению калибровки второго типа БИИМ, в котором гироскопы установлены в блоке с автокомпенсационным вращением, который вращается (или вращаются с реверсом) относительно приборных осей. При нулевом угле автокомпенсационного вращения системы координат $OX_B Y_B Z_B$ и $OX_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$ совпадают с трехгранником $OX_0 Y_0 Z_0$.

Ось автокомпенсационного вращения фиксируется неподвижно в нулевом положении, и калибровка второго типа БИИМ сводится к описанному выше случаю. Единственное отличие заключается в дополнительной проверке совпадения приборных осей ВИМ с приборными осями его вращающегося блока. При этом необходимо, чтобы погрешность совпадения осей не превышала 3".

Рассмотрим калибровку БИИМ третьего типа. БИИМ третьего типа необходимо развернуть на вращающемся стенде таким образом, чтобы при зафиксированной неподвижно в нулевом положении оси автокомпенсационного вращения приборная ось Y_{g1} совпала с осью вращения стенда. Этот разворот может быть произведен либо установкой БИИМ на прецизионный угольник с углом наклона к плоскости вращения стенда, равном $\beta_1 = 90^\circ - \alpha_0$, либо наклоном промежуточной оси стенда на тот же угол. Совмещение оси вращения стенда и двух других приборных осей X_{g1} и Z_{g1} трехгранника производится путем разворота вращающейся части БИИМ вокруг оси автокомпенсационного вращения на 120° и 240° соответственно и закрепления их в этом положении. Все операции, описанные выше для БИИМ первого типа, полностью сохраняются и для БИИМ третьего типа.

Таким образом, разработана единая методика для калибровки БИИМ, имеющих различные конструкции и различные системы автокомпенсационного вращения.

Оценка точности

Оценим точность нахождения масштабного коэффициента при его определении описанным выше методом.

Поварьируем одно из уравнений (13)

$$M_{gk} \int_0^T \omega_{gk} dt + \Delta M_{gk} \int_0^T \omega_{gk} dt + M_{gk} \int_0^T \Delta \omega_{gk} dt = \alpha_c(T) - \alpha_c(0) + \Delta \alpha_c(T) + \Delta \alpha_c(0), \quad (18)$$

где ΔM_{gk} – погрешность определения масштабного коэффициента; $\Delta \omega_{gk}$ – погрешность угловой скорости ухода гироскопа, вызванной ошибкой определения смещения и шумовой составляющей гироскопа; $\alpha_c(0), \alpha_c(T)$ – начальное и конечное значение угла поворота стенда; $\Delta \alpha_c(0), \Delta \alpha_c(T)$ – погрешности списывания значений угла поворота.

При варьировании, как обычно, пренебрегли величиной второго порядка малости $\Delta M_{gk} \cdot \Delta \omega_{gk}$. Очевидно

$$M_{gk} \int_0^T \omega_{gk} dt = \alpha_c(T) - \alpha_c(0). \quad (19)$$

С учетом (19) выражение (18) можно представить

$$\frac{\Delta M_{gk}}{M_{gk}} = \frac{\Delta \alpha_c(T) + \Delta \alpha_c(0) + \int_0^T \Delta \omega_{gk} dt}{\int_0^T \omega_{gk} dt}. \quad (20)$$

Из последнего выражения следует, что относительная ошибка масштабного коэффициента задается соотношением суммы погрешности списывания стенда и ухода гироскопа, отнесенной к полному углу разворота стенда. Поскольку при калибровке вращение будет происходить на целое число оборотов стенда, то знаменатель в выражении (20) можно заменить на $2\pi n$, где n – количество полных оборотов стенда. Полагая погрешности списывания углов датчиками стенда независимыми случайными величинами, получаем выражение для относительной ошибки определения масштабного коэффициента

$$\frac{\Delta M_{gk}}{M_{gk}} = \frac{\Delta\alpha_c \sqrt{2} + \int_0^T \Delta\omega_{gk} dt}{2\pi n}. \quad (21)$$

Если представить уход ВОГ, состоящим из случайной величины, представляющей ошибку определения нулевого смещения гироскопа, и шумовой составляющей, которую будем представлять белошумным процессом с ограниченным спектром, то можно получить выражение для относительной погрешности масштабного коэффициента в виде

$$\frac{\Delta M_{gk}}{M_{gk}} = \frac{1}{2\pi n} (\Delta\alpha_c + \Delta g_{0k} T + C_n \sqrt{2\pi T}), \quad (22)$$

где Δg_{0k} – погрешность определения смещения нуля ВОГ; C_n^2 – постоянное значение спектральной плотности сигнала.

Оценим погрешность выражения (22), для чего зададимся следующими реальными данными: $T = 360$ с; $2\pi n = 4.6 \cdot 10^7$ "/с; $\Delta\alpha_c = 2$ "/с; $C_n = 0.1 \frac{\text{угл.с}}{\sqrt{\text{с}}}$;

$\Delta g_{0k} = 0,01$ "/с. Подставляя данные в (22), получаем

$$\frac{\Delta M_{gk}}{M_{gk}} = 1.36 \cdot 10^{-7}.$$

Из оценки видно, что точность определения масштабного коэффициента соответствует предъявленным требованиям.

Варьируя аналогичным образом выражение (17) для нахождения коэффициента C_{yx} , получаем

$$\Delta C_{yx} = \frac{\Delta M_{gy}}{M_{gy}} + \frac{C_{yx} \Delta\alpha_c}{2\pi n} + \frac{M_{gy} \int_0^T \Delta\omega_{gy} dt}{2\pi n}. \quad (23)$$

Воспользовавшись числовыми данными приведенного выше примера для оценки ошибки масштабного коэффициента, получим ошибку оценки углов менее 1". Следует, однако, отметить, что этот вывод не корректен, так как обеспечивается привязка измерительных осей ВОГ к осям стенда, а не к приборным осям, которые могут быть отклонены от осей стенда на угол порядка 3". Из этого рассуждения можно сделать вывод, что реальная точность определения ориентации измерительных осей ВОГ обусловлена точностью привязки осей БИИМ к осям стенда.

Результаты испытаний

Разработанная методика калибровки проверялась на стенде АСТ 3000 фирмы Acutronic на экспериментальном образце БИМ-3. Следует отметить, что в приборе отсутствовала система термостабилизации и не была введена термокомпенсация уходов ВОГ от температуры.

Результаты определения смещения нулей ВОГ осредненные за 1 ч, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	ВОГХ $g_{ox}, \text{°/ч}$	ВОГУ $g_{oy}, \text{°/ч}$	ВОГZ $g_{oz}, \text{°/ч}$
Среднее значение	0.150	-0.009	-0.060
Разброс	0.008	0.006	0.008
$\Delta T, \text{°C}$	33.6...35.0	33.2...35.0	33.0...35.0

Примечание: ΔT – диапазон изменения температур за время измерений.

При определении масштабных коэффициентов и углов отклонений измерительных осей ВОГ от приборных значений БИИМ вращался вокруг каждой из осей с различными скоростями от 1 до 36 °/с в течение 30 мин. Температура за время испытаний изменялась максимум на 1 °С.

В табл. 2 приведены средние значения масштабных коэффициентов при вращении на разных скоростях по и против часовой стрелки, а также максимальный разброс масштабных коэффициентов.

Таблица 2

Наименование параметра	M_{gx}^+	M_{gx}^-	M_{gy}^+	M_{gy}^-	M_{gz}^+	M_{gz}^-
Среднее значение	1.746892	1.746890	1.664746	1.664747	1.730345	1.730357
Разброс	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$

Значительное изменение температуры во время калибровки не позволило достигнуть необходимой точности при определении масштабного коэффициента. Значения углов отклонения измерительных осей ВОГ от приборных осей приведены в табл. 3

Таблица 3

Наименование параметра	α_{yx}	α_{zx}	β_{xy}	β_{zy}	γ_{xz}	γ_{yz}
Среднее значение	-2.9'	1.8'	2.3'	1.3'	2.4"	2.7'
Разброс	0.6"	0.8"	1.6"	0.9"	1.0"	0.3"

Выводы

Разработана методика калибровки прецизионных ВОГ в составе БИИМ, обеспечивающая следующий уровень точностей:

- смещения нулей $\leq 0,008 \text{ °/ч}$;
- масштабные коэффициенты – 10^{-6} ;
- неортогональности измерительных осей $< 2''$.

Определены требования к стендовому оборудованию. Погрешность формирования эталонной информации об угловом движении платформы не должна превышать 3'' (3 σ), погрешность привязки осей прибора к осям стенда не должна превышать 3''.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Колеватов, А.П.** Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания / А.П.Колеватов [и др.] // Гироскопия и навигация № 3 (70) 2010, с.49-60.
2. **Pengfei Guo, Mei Wang, Zhang Ren, Haitao Qiu.** The new calibrating algorithm for the low-cost fiber-optics gyroscope // 2006 IEEE/ION Position, location and navigation symposium, 0-7803-9454-2/06, 2006, p.739-743.
3. **Shang Song-tian, Deng Zhi-hong, Fu Meng-yin, Gao Wen-shao.** Research on Real Time Compensation Technology of FOG Temperature Drift // Proceedings of 18th Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems, 2011, p.54-57.
4. **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
5. **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
6. **Атаманов, Н.А.** Калибровка блока чувствительных элементов БИНС / Н.А.Атаманов, В.А.Троицкий, И.В.Гусев // XII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», - 2005. - С. 162-164.
7. **Xu Bo, Sun Feng.** A FOG online calibration research based on high-precision three-axis turntable. IEEE 978-0-7695-3519-7/09, 2009, p.454-458.
8. **Измайлов, Е.А.** Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е.А.Измайлов [и др.] // Материалы XV Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». - 2008.- С. 145-154.
9. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н.Анучин, Г.И.Емельянцева // СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999.- 357 с.
10. **Синев, А.И.** Способ калибровки параметров бесплатформенного инерциального измерительного модуля / А.И.Синев [и др.] // Патент РФ №2269813.

Abstract. The paper focuses on test bench calibration of fiber-optic gyros with linear output within strapdown inertial measurement units of various designs. The required calibration accuracy and rate table performance are defined.

Key words: Fiber-optic gyro calibration, calibration using data about angular rate or angular position of testbench platform

Материал поступил 16.03.11