

В. В. Аврутов¹, А. Н. Сапегин¹,
З. С. Стефанишин¹, В. В. Цисарж²

БЛОЧНАЯ КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

¹Национальный технический университет Украины «КПИ»,
пр. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина; e-mail: vyshgorod@gmail.com
²Гос. предприятие «НИИ радиолокационных систем «Квант-радиолокация»,
ул. Дилова, 5, 03150, а/я 36, г. Киев, Украина

Abstract. A new calibration method is proposed for the inertial measurement units of strapdown inertial technology. Such a block consists of accelerometers, gyroscopes and a signal processing system. As a rule, the method of test turnings and rotations on rotary table is used for calibration of the inertial measurement unit. The new method is based on measurement of the full angle of turning or the final rotation. In fact, it is proposed to turn the inertial measurement unit around the axis of final rotation. To solve the equation of calibration, it is necessary to provide the equality of the rank and order of basic matrix. The results of modeling data demonstrate an efficiency of new method of calibration.

Key words: inertial measurement unit, calibration, accelerometer, gyroscope.

Введение.

Инерциально-измерительный модуль (ИИМ) является основным в построении инерциальных систем ориентации и навигации. Каждый ИИМ состоит как минимум из трех акселерометров и трех гироскопов – датчиков угловых скоростей [5].

Обычно гироскопы и акселерометры, до поступления на участок сборки ИИМ, проходят автономные испытания [15, 20, 22]. Однако важно определить их параметры в составе ИИМ, поскольку выходные параметры гироскопов и акселерометров ИИМ будут привязаны к его базовым осям. Поэтому калибровка ИИМ является неотъемлемым этапом подготовки к его эксплуатации или выставки инерциальной системы [16]. Под калибровкой понимают определение параметров ИИМ или его погрешностей для дальнейшего их использования в работе инерциальной системы.

Обычно калибровку ИИМ проводят методом тестовых поворотов [6, 8, 15, 16, 20]. При калибровке акселерометров в составе ИИМ, как правило, используется оптическая делительная головка (ОДГ), которая позволяет довольно точно поворачивать объект испытаний вокруг горизонтальной оси вращения. Для калибровки блока акселерометров методом тестовых поворотов необходимо проводить измерения выходных сигналов, вначале поворачивая блок вокруг оси ox , а затем, переставляя блок акселерометров на ОДГ так, чтобы поворот осуществлялся вокруг оси oy , и наконец, повторяя процедуру, чтобы поворот осуществлялся вокруг оси oz [6]. Для практики такая ориентация блока является частным случаем. На самом деле, поворот объекта происходит на некоторый конечный угол, который является результатом поворотов вокруг двух или трех ортогональных осей.

При калибровке гироскопов в составе ИИМ, как правило, используется поворотная установка. Стандартный метод калибровки блока гироскопов [6] состоит в последовательном вращении объекта испытаний сначала вокруг одной оси, например, ox с угловой скоростью ω_{xi} , затем вокруг другой oy с угловой скоростью ω_{yi} и, наконец,

вокруг третьей оси oz с угловой скоростью ω_{zi} (i – номер испытания). Следует отметить, что, во-первых, такой метод занимает достаточно много времени, а во-вторых, в реальных условиях объект может совершать вращение одновременно вокруг нескольких осей или вокруг оси конечного поворота.

До сих пор речь шла о калибровке детерминированных параметров ИИМ. Однако, кроме детерминированных, на выходе ИИМ имеются стохастические составляющие в виде шумов различной природы.

Существует несколько способов оценки влияния и компенсации шумовых составляющих выходных сигналов датчиков. Наиболее распространенным является использование фильтра Калмана [13, 14, 17, 18]. Также широко используется аппарат вариаций Аллана [7] и иногда – Вейвлет преобразования [3, 19]. Еще реже используют алгоритмы нечеткой логики [12] и искусственных нейронных сетей [11, 21].

Кроме метода тестовых поворотов известен также скалярный способ калибровки [1, 4, 9, 10], который предполагает поворот объекта калибровки происходящим вокруг вектора конечного поворота. Согласно скалярному способу калибровки, в качестве эталона измеряемой величины принимают не вектор, а скалярную величину. В гравитационном поле Земли на неподвижном основании для акселерометров такой скалярной величиной будет являться величина ускорения силы тяжести g , а для гироскопов – угловая скорость вращения Земли Ω или вращательной установки ω . Однако, данный метод имеет свои особенности и недостатки.

Покажем новый способ калибровки, при котором объект вращается (поворачивается) вокруг произвольной оси, не совпадающей ни с одной из осей координатного трехгранника.

§1. Калибровка блока осевых акселерометров в составе ИИМ.

Запишем выражения для выходных сигналов блока осевых акселерометров [7]:

$$\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{1a} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где B_{ax}, B_{ay}, B_{az} – нулевые сигналы акселерометров, a_x, a_y, a_z – проекции кажущегося ускорения, n_{ax}, n_{ay}, n_{az} – шумы в выходных сигналах акселерометров, $Oxyz$ – система координат, связанная с блоком акселерометров,

$$\mathbf{M}_{1a} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad k_{11}, k_{22}, k_{33} - \text{масштабные коэффициенты акселерометров; все}$$

другие элементы матрицы – коэффициенты перекрестной связи.

Для уменьшения влияния шумов измерений будем усреднять выходные сигналы в течение 30, ..., 60 сек. Поэтому в дальнейшем пренебрегаем величинами n_{ax}, n_{ay}, n_{az} . Запишем уравнение (1.1) отдельно для каждого акселерометра и для i -го положения ИИМ (испытания):

$$\begin{aligned} U_{axi} &= B_{ax} + k_{11}a_{xi} + k_{12}a_{yi} + k_{13}a_{zi}; & U_{ayi} &= B_{ay} + k_{21}a_{xi} + k_{22}a_{yi} + k_{23}a_{zi}; \\ U_{azi} &= B_{az} + k_{31}a_{xi} + k_{32}a_{yi} + k_{33}a_{zi}. \end{aligned}$$

Проведем серию из n испытаний (измерений) при одновременном повороте на углы α, β, γ вокруг трех осей с определенным шагом поворота.

Рассмотрим выходной сигнал первого акселерометра:

$$1\text{-е измерение: } U_{ax1} = B_{ax} + k_{11}a_{x1} + k_{12}a_{y1} + k_{13}a_{z1};$$

$$2\text{-е измерение: } U_{ax2} = B_{ax} + k_{11}a_{x2} + k_{12}a_{y2} + k_{13}a_{z2};$$

.....

$$n\text{-е измерение: } U_{axn} = B_{ax} + k_{11}a_{xn} + k_{12}a_{yn} + k_{13}a_{zn}.$$

Полученную систему уравнений запишем в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} U_{ax1} \\ U_{ax2} \\ \vdots \\ U_{axn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ 1 & a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{ax} \\ k_{11} \\ k_{12} \\ k_{13} \end{bmatrix}.$$

Аналогичные уравнения можно получить для двух других акселерометров – для второго и третьего.

Объединим полученные матричные уравнения в одно уравнение калибровки:

$$\mathbf{U}_{a1} = \mathbf{G}_{n \times 4} \cdot \mathbf{X}_1, \quad (1.2)$$

где

$$\mathbf{U}_{a1} = \begin{bmatrix} U_{ax1} & U_{ay1} & U_{az1} \\ U_{ax2} & U_{ay2} & U_{az2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{axn} & U_{ayn} & U_{azn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_{n \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ 1 & a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} B_{ax} & B_{ay} & B_{az} \\ k_{11} & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & k_{22} & k_{32} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix}.$$

Решаем последнее матричное уравнение методом наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{X}}_1 = (\mathbf{G}_{n \times 4}^T \mathbf{G}_{n \times 4})^{-1} \mathbf{G}_{n \times 4}^T \mathbf{U}_{a1}. \quad (1.3)$$

Здесь верхний индекс Т обозначает операцию транспонирования матрицы.

Пример 1. Рассмотрим блок акселерометров со следующими номинальными параметрами:

$$B_{ax} = B_{ay} = B_{az} = 2,5 \text{ В}; \quad k_{11} = k_{22} = k_{33} = 1,0 \text{ В/г};$$

$$k_{12} = 0,01 \text{ В/г}; \quad k_{13} = -0,01 \text{ В/г}; \quad k_{21} = -0,01 \text{ В/г};$$

$$k_{23} = 0,01 \text{ В/г}; \quad k_{31} = 0,01 \text{ В/г}; \quad k_{32} = -0,01 \text{ В/г}.$$

Повороты основания на углы α, β, γ будем задавать в пределах от 0 до 400° с одинаковым шагом 10° (всего $n = 40$ положений).

На рис. 1 приведены расчетные значения выходных сигналов акселерометров (1.2) в вольтах для матрицы $\mathbf{G}_{n \times 4}$ размерности $n \times 4$.

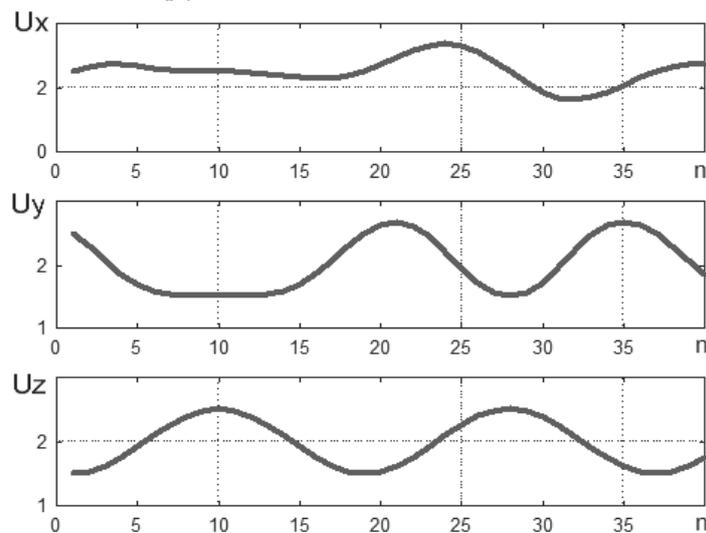


Рис. 1

Проводя вычисления по формуле (1.3), получим:

$$\hat{\mathbf{X}}_1 = \begin{bmatrix} 2,5 & 2,5 & 2,5 \\ 1,0 & -0,01 & 0,009999 \\ 0,01 & 1,0 & -0,009999 \\ -0,009999 & 0,01 & 1,0 \end{bmatrix}.$$

Итак, в результате измерений (1.2) и вычислений (1.3) удастся получить оценки смещений нуля $\hat{\mathbf{V}}_a$, масштабных коэффициентов и коэффициентов перекрестной связи – элементов матрицы \mathbf{M}_{1a} .

Покажем, что этот же метод работает и для блока маятниковых акселерометров.

§2. Калибровка блока маятниковых акселерометров в составе ИИМ.

Выходные сигналы блока маятниковых акселерометров в поле силы тяжести на неподвижном основании имеют вид [20]:

$$\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{1a} \cdot \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{2a} \cdot \begin{bmatrix} g_x g_y \\ g_y g_z \\ g_x g_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где

$$\mathbf{M}_{1a} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_{2a} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}.$$

После проведения серии из n испытаний (измерений) и после усреднения выходных сигналов в течение 30, ..., 60 сек матричное уравнение калибровки (2.1) приобретёт вид

$$\mathbf{U}_{a2} = \mathbf{G}_{n \times 7} \cdot \mathbf{X}_2, \quad (2.2)$$

где

$$\mathbf{U}_{a2} = \begin{bmatrix} U_{ax1} & U_{ay1} & U_{az1} \\ U_{ax2} & U_{ay2} & U_{az2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{axn} & U_{ayn} & U_{azn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} B_{ax} & k_{11} & k_{12} & k_{13} & l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ B_{ay} & k_{21} & k_{22} & k_{23} & l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ B_{az} & k_{31} & k_{32} & k_{33} & l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}^T;$$

$$\mathbf{G}_{n \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & g_{x1} & g_{y1} & g_{z1} & g_{x1}g_{y1} & g_{y1}g_{z1} & g_{x1}g_{z1} \\ 1 & g_{x2} & g_{y2} & g_{z2} & g_{x2}g_{y2} & g_{y2}g_{z2} & g_{x2}g_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & g_{xn} & g_{yn} & g_{zn} & g_{xn}g_{yn} & g_{yn}g_{zn} & g_{xn}g_{zn} \end{bmatrix}.$$

Решаем матричное уравнение (2.2) методом наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{X}}_2 = (\mathbf{G}_{n \times 7}^T \mathbf{G}_{n \times 7})^{-1} \mathbf{G}_{n \times 7}^T \mathbf{U}_{a2}. \quad (2.3)$$

Пример 2. Пусть блок маятниковых акселерометров имеет следующие номинальные параметры:

$$B_{ax} = B_{ay} = B_{az} = 2,5 \text{ В};$$

$$\begin{aligned}
k_{11} &= 1,0 \text{ В/г}; & k_{12} &= 0,01 \text{ В/г}; & k_{13} &= -0,01 \text{ В/г}; \\
k_{21} &= -0,01 \text{ В/г}; & k_{22} &= 1,0 \text{ В/г}; & k_{23} &= 0,01 \text{ В/г}; \\
k_{31} &= 0,01 \text{ В/г}; & k_{32} &= -0,01 \text{ В/г}; & k_{33} &= 1,0 \text{ В/г}; \\
l_{11} &= -0,001 \text{ В/г}^2; & l_{12} &= 0,001 \text{ В/г}^2; & l_{13} &= 0,001 \text{ В/г}^2; \\
l_{21} &= 0,001 \text{ В/г}^2; & l_{22} &= -0,001 \text{ В/г}^2; & l_{23} &= 0,001 \text{ В/г}^2; \\
l_{31} &= 0,001 \text{ В/г}^2; & l_{32} &= 0,001 \text{ В/г}^2; & l_{33} &= -0,001 \text{ В/г}^2.
\end{aligned}$$

Повороты основания на углы α, β, γ будем задавать в пределах от 0 до 400° с одинаковым шагом 10° (всего $n = 40$ положений).

На рис. 2 приведены расчетные значения выходных сигналов блока маятниковых акселерометров (2.2) в вольтах для матрицы $\mathbf{G}_{n \times 7}$ размерности $n \times 7$.

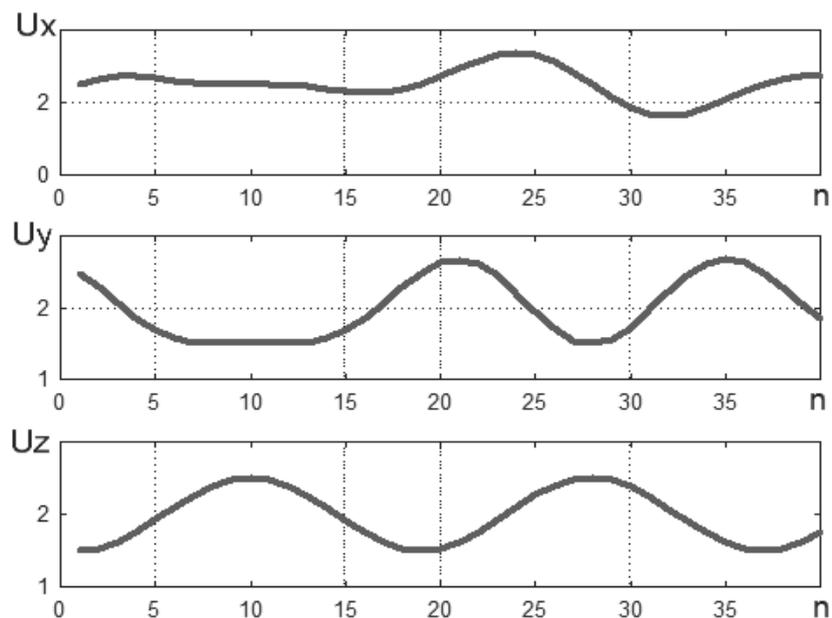


Рис. 2

Вычисляя по формуле (2.3), получаем

$$\hat{\mathbf{X}}_2 = \begin{bmatrix} 2,5 & 2,5 & 2,5 \\ 1 & -0,01 & 0,01 \\ 0,01 & 1 & -0,01 \\ -0,01 & 0,01 & 1 \\ -0,001 & 0,001 & 0,001 \\ 0,001 & -0,001 & 0,001 \\ 0,001 & 0,001 & -0,001 \end{bmatrix}.$$

Итак, в результате измерений (2.2) и расчетов (2.3) можно получить оценки смещений нуля $\hat{\mathbf{V}}_a$ и коэффициентов матриц $\mathbf{M}_{1a}, \mathbf{M}_{2a}$.

§3. Калибровка блока гироскопов.

Запишем выражения для выходных сигналов блока гироскопов в виде [7]:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\omega x}^* \\ B_{\omega y}^* \\ B_{\omega z}^* \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{1\omega} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

В уравнении (3.1) обозначено: $B_{\omega x}^*, B_{\omega y}^*, B_{\omega z}^*$ – нулевые сигналы гироскопов, которые могут содержать дрейфы, зависящие от g и g^2 ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости ИИМ на оси ox, oy, oz ; $n_{\omega x}, n_{\omega y}, n_{\omega z}$ – шумы в выходных сигналах гироскопов; матрица $\mathbf{M}_{1\omega}$ размерности 3×3 :

$$\mathbf{M}_{1\omega} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим метод калибровки блока гироскопов, при котором вращение происходит вокруг нескольких осей одновременно.

После проведения серии n испытаний (измерений) при вращении с угловыми скоростями $\omega_{xi}, \omega_{yi}, \omega_{zi}$ и после усреднения выходных сигналов в течение $30, \dots, 60$ сек получим уравнение калибровки

$$\mathbf{U}_{\omega 3} = \boldsymbol{\omega}_{n \times 4} \cdot \mathbf{X}_3, \quad (3.2)$$

где

$$\mathbf{U}_{\omega 3} = \begin{bmatrix} U_{\omega x1} & U_{\omega y1} & U_{\omega z1} \\ U_{\omega x2} & U_{\omega y2} & U_{\omega z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{\omega xn} & U_{\omega yn} & U_{\omega zn} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\omega}_{n \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{x1} & \omega_{y1} & \omega_{z1} \\ 1 & \omega_{x2} & \omega_{y2} & \omega_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \omega_{xn} & \omega_{yn} & \omega_{zn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} B_{\omega x}^* & B_{\omega y}^* & B_{\omega z}^* \\ n_{11} & n_{21} & n_{31} \\ n_{12} & n_{22} & n_{32} \\ n_{13} & n_{23} & n_{33} \end{bmatrix}.$$

На первый взгляд, структура уравнения (3.2) очень подобна уравнению (1.2), отличие которых состоит в том, что матрица $\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}$ состоит из проекций угловых скоростей, а матрица $\mathbf{G}_{n \times 4}$ – из проекций кажущегося ускорения. Однако, если при калибровке блока акселерометров задавалась последовательность поворотов основания без каких-либо ограничений, то при задании проекций угловых скоростей следует обеспечить, чтобы $\text{rank } \boldsymbol{\omega}_{n \times 4} = 4$.

Это условие может быть получено, например, при нелинейной зависимости трех последних столбцов матрицы $\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}$.

Действительно, согласно правилу Кронекера и Капелли [2], если ранг матрицы $\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}$ равен рангу расширенной матрицы, составленной из матрицы $\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}$ и матрицы правых частей $\mathbf{U}_{\omega 3}$,

$$\text{rank } \boldsymbol{\omega}_{n \times 4} = \text{rank } [\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}, \mathbf{U}_{\omega 3}],$$

то система уравнений будет иметь решение.

Проверкой установлено, что при нелинейной зависимости трех последних столбцов матрицы $\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}$, $\text{rank } \boldsymbol{\omega}_{n \times 4} = 4$ и $\text{rank } [\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}, \mathbf{U}_{\omega 3}] = 4$.

Таким образом, получено следующее условие: чтобы имело место решение уравнения калибровки, необходимо обеспечить равенство ранга основной матрицы уравнения калибровки её порядку или числу столбцов.

Решая матричное уравнение методом наименьших квадратов, получаем

$$\hat{X}_3 = (\omega_{n \times 4}^T \omega_{n \times 4})^{-1} \omega_{n \times 4}^T U_{\omega_3}. \quad (3.3)$$

Пример 3. Рассмотрим блок гироскопов со следующими номинальными параметрами:

$$\begin{aligned} B_{\omega_x}^* = B_{\omega_y}^* = B_{\omega_z}^* = 2,0 \text{ В}; \quad n_{11} = n_{22} = n_{33} = 1,0 \text{ В}/(d/s); \\ n_{12} = 0,01 \text{ В}/(d/s); \quad n_{13} = -0,01 \text{ В}/(d/s); \quad n_{21} = -0,01 \text{ В}/(d/s); \\ n_{23} = 0,01 \text{ В}/(d/s); \quad n_{31} = 0,01 \text{ В}/(d/s); \quad n_{32} = -0,01 \text{ В}/(d/s). \end{aligned}$$

Для обеспечения равенства ранга матрицы $\omega_{n \times 4}$ ее порядку, зададим проекции угловых скоростей станда в виде

$$\omega_{xi} = \omega_i; \quad \omega_{yi} = \omega_i^{1/2}; \quad \omega_{zi} = \omega_i^{1/3}.$$

Угловую скорость ω_i зададим в пределах от 0 до 100°/сек с одинаковым шагом 10°/сек (всего $n = 10$ значений угловой скорости).

Расчетные значения выходных сигналов блока гироскопов представлены на рис. 3.

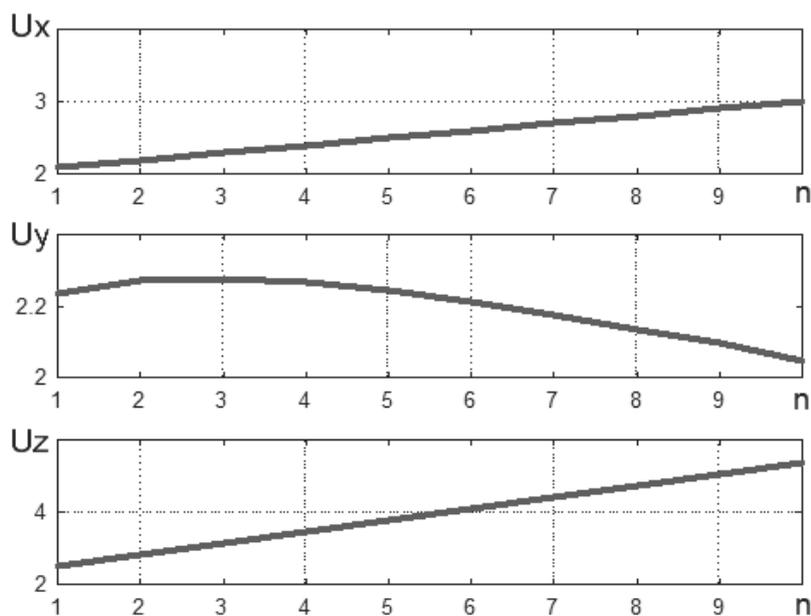


Рис. 3

Решая уравнение калибровки согласно (3.3), получаем

$$\hat{X}_3 = \begin{bmatrix} 2,0 & 2,0 & 2,0 \\ 1,0 & -0,01 & 0,03 \\ 0,01 & 1,0 & -0,01 \\ -0,02 & 0,01 & 1,0 \end{bmatrix}.$$

Итак, данный метод калибровки блока гироскопов позволяет определить набор нулевых сигналов гироскопов, а также элементы матрицы $M_{1\omega}$.

§4. Калибровка блока гироскопов (расширенная модель).

Запишем выражения для выходных сигналов блока гироскопов в расширенном виде [20]:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\omega x}^* \\ B_{\omega y}^* \\ B_{\omega z}^* \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{1\omega} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{2\omega} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Здесь матрицы $\mathbf{M}_{1\omega}, \mathbf{M}_{2\omega}$ имеют следующий вид:

$$\mathbf{M}_{1\omega} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_{2\omega} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}.$$

По-прежнему рассматриваем метод калибровки блока гироскопов, при котором вращение происходит вокруг нескольких осей одновременно.

После проведения серии n испытаний (измерений) при вращении с угловыми скоростями $\omega_{xi}, \omega_{yi}, \omega_{zi}$ и после усреднения выходных сигналов в течение 30, ..., 60 сек уравнение (4.1) принимает вид

$$\mathbf{U}_{\omega 4} = \boldsymbol{\omega}_{n \times 7} \cdot \mathbf{X}_4, \quad (4.2)$$

где

$$\mathbf{U}_{\omega 4} = \begin{bmatrix} U_{\omega x1} & U_{\omega y1} & U_{\omega z1} \\ U_{\omega x2} & U_{\omega y2} & U_{\omega z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{\omega xn} & U_{\omega yn} & U_{\omega zn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\omega}^T \\ \mathbf{M}_{1\omega}^T \\ \mathbf{M}_{2\omega}^T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{\omega}^T = [B_{\omega x}^* \quad B_{\omega y}^* \quad B_{\omega z}^*];$$

$$\boldsymbol{\omega}_{n \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{x1} & \omega_{y1} & \omega_{z1} & \omega_{x1}\omega_{y1} & \omega_{y1}\omega_{z1} & \omega_{x1}\omega_{z1} \\ 1 & \omega_{x2} & \omega_{y2} & \omega_{z2} & \omega_{x2}\omega_{y2} & \omega_{y2}\omega_{z2} & \omega_{x2}\omega_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \omega_{xn} & \omega_{yn} & \omega_{zn} & \omega_{xn}\omega_{yn} & \omega_{yn}\omega_{zn} & \omega_{xn}\omega_{zn} \end{bmatrix}.$$

Решая полученное матричное уравнение (4.2) методом наименьших квадратов, получим

$$\hat{\mathbf{X}}_4 = (\boldsymbol{\omega}_{n \times 7}^T \boldsymbol{\omega}_{n \times 7})^{-1} \boldsymbol{\omega}_{n \times 7}^T \mathbf{U}_{\omega 4}. \quad (4.3)$$

Пример 4. Рассмотрим блок гироскопов со следующими номинальными параметрами:

$$\begin{aligned} B_{\omega x}^* &= B_{\omega y}^* = B_{\omega z}^* = 2,0 \text{ В}; & n_{11} &= n_{22} = n_{33} = 1,0 \text{ В} / (d / s); \\ n_{12} &= 0,01 \text{ В} / (d / s); & n_{13} &= -0,01 \text{ В} / (d / s); & n_{21} &= -0,01 \text{ В} / (d / s); \\ n_{23} &= 0,01 \text{ В} / (d / s); & n_{31} &= 0,01 \text{ В} / (d / s); & n_{32} &= -0,01 \text{ В} / (d / s); \\ p_{11} &= -0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{12} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{13} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; \\ p_{21} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{22} &= -0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{23} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; \\ p_{31} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{32} &= 0,001 \text{ В} / (d / s)^2; & p_{33} &= -0,001 \text{ В} / (d / s)^2. \end{aligned}$$

Для того, чтобы обеспечить $\text{rank } \boldsymbol{\omega}_{n \times 7} = 7$, будем задавать проекции угловых скоростей стенда в виде

$$\omega_{xi} = \omega_i; \quad \omega_{yi} = e^{-\omega_i}; \quad \omega_{zi} = \omega_i^{1/3}.$$

Угловую скорость ω_i будем задавать в пределах от 0 до 100°/сек с одинаковым шагом 10°/сек (всего $n = 10$ значений угловой скорости).

Расчетные значения выходных сигналов блока гироскопов представлены на рис. 4.

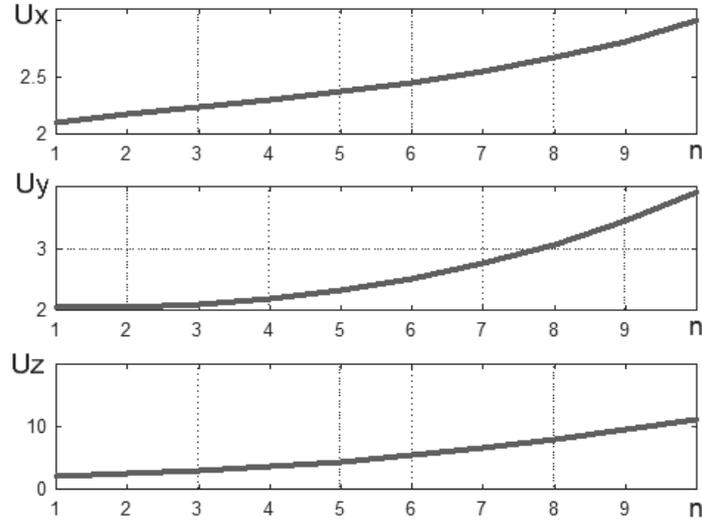


Рис. 4

Решая матричное уравнение (4.3) методом наименьших квадратов, получим

$$\hat{X}_4 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 0,01 & -0,01 & 0,03 \\ 0,01 & 0,1 & -0,01 \\ -0,02 & 0,01 & 0,1 \\ -0,001 & 0,001 & 0,001 \\ 0,001 & 0,001 & -0,001 \\ 0,001 & -0,001 & 0,001 \end{bmatrix}.$$

Итак, данный метод калибровки блока гироскопов позволяет определить набор нулевых сигналов гироскопов, а также элементы матриц $M_{1\omega}$, $M_{2\omega}$.

Выводы.

1. Предложен метод калибровки блока акселерометров и блока гироскопов, который состоит в повороте ИИМ на конечный угол или повороте ИИМ вокруг вектора конечного поворота.
2. Для полного решения уравнения калибровки необходимо обеспечить равенство ранга основной матрицы уравнения калибровки её порядку или числу столбцов.
3. Результаты математического моделирования подтверждают правильность предложенного метода.

РЕЗЮМЕ. Представлено новий метод калібрування інерціальних вимірювальних блоків для безплатформової інерціальної технології. Інерціальний вимірювальний блок складається з акселерометрів, гіроскопів і системи обробки сигналів. Як правило, для калібрування інерціального вимірювального блоку використовують метод тестових поворотів та обертання на поворотному столі. Новий метод калібрування оснований на вимірюванні повного кута повороту або кінцевого обертання. Фактично пропонується повертати інерціальний вимірювальний блок навколо однієї осі кінцевого повороту. Для розв'язання рівняння калібрування необхідно забезпечити рівність рангу основної матриці порядку базової матриці. Результати змодельованих даних ІВБ представлено для демонстрації ефективності нового методу калібрування.

1. *Аврutow В.В.* О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2010. – Вип. 40. – С. 10 – 17.
2. *Бугров Я.С., Никольский С.М.* Высшая математика. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии / М.: Наука, 1984. – 192 с.
3. *Головач С.В.* Экспериментальное исследование характеристик лазерного гироскопа // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2014. – Вип. 40. – С. 33 – 38.
4. *Измайлов Е.А., Лене С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф.* Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Труды XV Международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2008. – С. 145 – 154.
5. *Ларин В.Б., Туник А.А.* О системе инерциальной навигации без датчиков угловой скорости // Прикл. механика. – 2013. – 49, N 4. – С. 130 – 144.
6. *Мелешко В.В., Нестеренко О.И.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД – Сервис, 2011. – 172 с.
7. *Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В.* О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Аллана // Труды XXII Международной конференции по интегрированным навигационным системам / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор». – СПб., 2015. – С. 485 – 491.
8. *Artese G., Trecroci A.* Calibration of a low cost MEMS INS sensor for an integrated navigation system // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVII. Part B5. – Beijing, 2008. – P. 877 – 882.
9. *Avrutov V., Golovach S., Mazepa T.* On Scalar Calibration of an Inertial Measurement Unit // Proc. of 19-th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 2012. – State Research Center (CSRI) Elektronpribor, 2012. – P. 117 – 121.
10. *Avrutov V.* Scalar Diagnostics of the Inertial Measurement Unit // I. J. Intelligent Systems and Applications, 2015. – 11. – P. 1 – 9.
11. *El-Rabbany A., El-Diasty M.* An efficient neural modal for denoising of MEMS-based inertial data // The J. of Navigation. – 2004. – 57. – P. 407 – 415.
12. *Gaysse J.* A low cost absolute position calculation system // Proc. of SICE-ICASE Int. Joint Conference. – Busan, Korea, 2006. – P. 5658 – 5661.
13. *Grewal M. S., Henderson, V. D., Miyasako R.S.* Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1991. – 36. – P. 3 – 13.
14. *Hide C., Moore T., Smith M.* Adaptive Kalman filtering for low-cost INS/GPS // The J. of Navigation, 2003. – 56. – P. 143 – 152.
15. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology. Navigation, Guidance and Control. – New-York: Springer-Verlag, 1993. – 259 p.
16. *Nebot E., Durrant-Whyte H.* Initial Calibration and Alignment of Low Cost Inertial Navigation Units for Land Vehicle Applications // J. of Robotics Systems. – 1999. – 16, N 2. – P. 81 – 92.
17. *Nikbakht N., Mazlom M., Khayatian A.* Evaluation of solid-state accelerometer for positioning of vehicle. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Technology. – Hong Kong, 2005. – P. 729 – 733.
18. *Pang G., Liu H.* Evaluation of a low-cost MEMS accelerometer for distance measurement // The J. of Intelligent and Robotic Systems. – 2001. – 30. – P. 249 – 265.
19. *Shen S.C., Chen C.J., Huang H.J.* A new calibration method for low cost MEMS inertial sensor module // J. of Marine Science and Technology. – 2010. – 18, N 6. – P. 819 – 824.
20. *Titterton D.H. and Weston J.L.* Strapdown Inertial Navigation Technology // IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics. – 2004, Series 17. – P. 558.
21. *Wang H., Tian W.* Modeling the random drift of micro-machined gyroscope with neural network // Neural Processing Letters. – 2005. – 22. – P. 235 – 247.
22. *Wrigley W., Hollister W., Denhard W.* Gyroscopic Theory, Design and Instrumentation. – Cambridge: MIT Press, 1969. – 464 p.

Поступила 22.04.2016

Утверждена в печать 29.11.2016