

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 531.383

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.1.52999

В.В. Аврутов¹, С.В. Головач², О.М. Сапегін¹, М.Ю. Хутко¹¹Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна²КП СПБ “Арсенал”

МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ І КОРЕКЦІЇ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ТРИВІСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Background. Calibration is one of the most important stages of work for putting into operation such navigation sensors as accelerometers.

Objective. The aim of this study is to investigate the possibility of using the calibration and correction method of the output signals of the triaxial accelerometer.

Methods. To work with the model outputs matrix methods of linear algebra are used. In particular, determining the unknown parameters of the model is based on the method of least squares. Correction algorithm is given in the form of a matrix notation for solving system of linear equations. Such methods of mathematical statistics as the standard deviation and the mathematical expectation were used for the output signals correction estimation.

Results. Formulas for calculations of calibration parameters were obtained, and correction link for output accelerometer signals was developed. Experimental calibration was organized and the data obtained by the algorithm of calibration and correction link was processed. The results of studies for several test samples of triaxial accelerometers are presented.

Conclusions. Using the calibration coefficients, which combine error scale factors and non-orthogonal axes errors can significantly reduce the computational load on the electronic signals processing unit and make output signals with a satisfactory accuracy.

Keywords: navigation sensors, accelerometers, calibration, output signals correction, Allan variation.

Вступ

Вихідний сигнал акселерометра має дві основні групи похибок – детерміновані та стохастичні. Об'єктом дослідження роботи є перша група похибок. До таких похибок акселерометра належать зсув нуля і похибка масштабного коефіцієнта. Для тривісного блока акселерометрів (АК) так само характерні похибки, що викликані неортогональністю осей чутливості акселерометричних датчиків. Ці похибки можуть бути виправлені калібруванням на підставі лабораторних вимірювань. Критерієм успішного калібрування є вимірювання еталонної величини з допустимою похибкою [1], що задається технічним завданням на розробку тривісного акселерометра або іншими нормативними документами на досліджуваний тип акселерометра.

Більшість алгоритмів визначення калібрувальних параметрів розроблено на основі методу скалярною калібрування, який отримав свою назву завдяки тому, що як еталон вимірюваної величини покладається скалярна величина. У розглядуваному випадку для тривісного блока АК такою величиною буде прискорення сили тяжіння g у гравітаційному полі Землі. На сьогодні існує досить велика кількість методик калібрування навігаційних датчиків, де

як еталон для калібрування використовують скалярну величину [2–13]. У методиках [2–4] розглянуто основні особливості скалярного методу калібрування інерціально-вимірювального модуля. У праці [3] зазначено, що цей метод не висуває жорстких вимог до кутового виставлення випробувального обладнання та виставлення датчиків на випробувальному обладнанні. Однак специфікою скалярного способу калібрування є зв'язка в пари окремих кутів неортогональності монтажу інерційних датчиків у тривісному блоці. В [5] автори вказують на високу чутливість алгоритму калібрування до наявності перехресних зв'язків, викликаних неортогональністю осей чутливості акселерометрів у тривісному блоці. На основі скалярного методу калібрування розроблено низку методик для калібрування мікромеханічних датчиків [9, 10] та діагностики роботи більш точних інерціальних датчиків, що входять до складу безплатформних навігаційних систем [11, 12]. Також у праці [13] розглянуто можливість калібрування навігаційного блока АК на недорогому прецизійному одновісному поворотному стенді, за який була використана поширена в промисловості оптична ділильна голівка, і зроблено висновок про те, що калібрування має задовільну якість за інтегральним критерієм.

Постановка задачі

Стаття присвячена розробці методики, що охоплює процес калібрування і корекцію вихідних сигналів тривісного акселерометра, та оцінці ефективності такої методики на основі експериментальних досліджень, проведених на тривісному поворотному столі.

Модель вихідних сигналів тривісного акселерометра

Особливістю використовуваного алгоритму калібрування та корекції є застосування моделі сигналів (АК), що часто використовується у методиках скалярних калібрувань на нерухомій основі в полі сили тяжіння.

З урахуванням похибок вимірювального тракту (нульових сигналів, похибок масштабних коефіцієнтів), неортогональності осей чутливості акселерометрів, що призводять до перехресних зв'язків, а також випадкових шумів вихідні сигнали акселерометрів мають вигляд

$$\begin{cases} A_x = b_x + k_x a_x + \Delta_{xz} a_y - \Delta_{xy} a_z + n_x, \\ A_y = b_y + k_y a_y - \Delta_{yz} a_x + \Delta_{yx} a_z + n_y, \\ A_z = b_z + k_z a_z + \Delta_{zy} a_x - \Delta_{zx} a_y + n_z, \end{cases} \quad (1)$$

де ліві частини рівнянь являють собою вихідні сигнали вимірювальних каналів тривісного акселерометра, a_x, a_y, a_z – проекції вектора прискорення сили тяжіння на осі ортогональної системи координат, що номінально збігаються з осями чутливості акселерометрів, b_x, b_y, b_z – зміщення нулів АК, k_x, k_y, k_z – масштабні коефіцієнти АК, $\Delta_{xy}, \Delta_{xz}, \Delta_{yx}, \Delta_{yz}, \Delta_{zx}, \Delta_{zy}$ – кути неортогональності осей чутливості АК, n_x, n_y, n_z – випадкові шуми (рис. 1).

Моделі вихідних сигналів вигляду (1) найбільш точно відповідають вихідним інформаційним сигналам тривісного АК у досліджуваних зразках.

Подамо систему рівнянь (1) у такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де елементи K_{11}, K_{22}, K_{33} матриці 3×3 являють

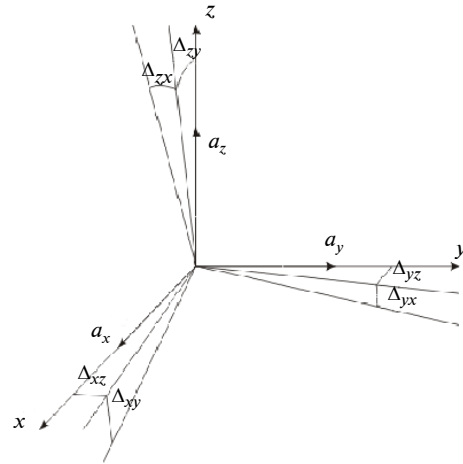


Рис. 1. Кути неортогональності осей чутливості тривісного акселерометра

собою масштабні коефіцієнти, а всі інші елементи цієї матриці – коефіцієнти перехресних зв'язків унаслідок неортогональності осей чутливості АК.

Рівняння (2) у векторно-матричній формі буде мати такий вигляд:

$$\mathbf{A} = \mathbf{b} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{n}, \quad (3)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}.$$

На підставі результатів попередніх досліджень стохастичних характеристик досліджуваних зразків АК, що входять до тривісного блока, методом варіації Алана [14–16] мінімальний час накопичення даних для калібрування в процесі лабораторних вимірювань можна вибрати таким чином, що математичні сподівання шумів цих показів будуть дорівнювати нулю:

$$M\{n_x\} = M\{n_y\} = M\{n_z\} = 0.$$

З урахування цього рівняння (3) спрощується до такого вигляду:

$$\mathbf{A} = \mathbf{b} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{a}. \quad (4)$$

Методика визначення параметрів для корекції вихідних сигналів

За умови проведення $i \geq 4$ випробувань для різних просторових орієнтацій тривісного АК кожне з рівнянь системи (4) можна розглянути як систему з i рівнянь та розв'язати її окремо за допомогою методу найменших квадратів.

Для i -ї кількості випробувань представимо кожне з рівнянь системи (4) у векторно-матричній формі:

$$A_x = b_x + K_{11} a_x + K_{12} a_y + K_{13} a_z \Rightarrow A_x = G \cdot X,$$

$$\text{де } G_x = \begin{bmatrix} 1 & a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} \\ 1 & a_{x_2} & a_{y_2} & a_{z_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & a_{x_i} & a_{y_i} & a_{z_i} \end{bmatrix}, A_x = \begin{bmatrix} A_{x_1} \\ A_{x_2} \\ \dots \\ A_{x_i} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} b_x \\ K_{11} \\ K_{12} \\ K_{13} \end{bmatrix}.$$

Аналогічно для інших рівнянь системи:

$$A_y = b_y + K_{21} a_x + K_{22} a_y + K_{23} a_z \Rightarrow A_y = G \cdot Y,$$

$$\text{де } A_y = \begin{bmatrix} A_{y_1} \\ A_{y_2} \\ \dots \\ A_{y_i} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} b_y \\ K_{21} \\ K_{22} \\ K_{23} \end{bmatrix}.$$

$$A_z = b_z + K_{31} a_x + K_{32} a_y + K_{33} a_z \Rightarrow A_z = G \cdot Z,$$

$$\text{де } A_z = \begin{bmatrix} A_{z_1} \\ A_{z_2} \\ \dots \\ A_{z_i} \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} b_z \\ K_{31} \\ K_{32} \\ K_{33} \end{bmatrix}.$$

Розв'язок цих рівнянь методом найменших квадратів матиме такий вигляд:

$$X = (G_x^T \cdot G_x)^{-1} G_x^T \cdot A_x,$$

$$Y = (G_y^T \cdot G_y)^{-1} G_y^T \cdot A_y,$$

$$Z = (G_z^T \cdot G_z)^{-1} G_z^T \cdot A_z.$$

Скориставшись визначенням таким чином зміщення нулів та елементами матриці **K**, для інформаційних каналів тривісного АК можна створити коректуючу ланку. Для цього потріб-

но розв'язати рівняння (4) відносно проєкцій вектора прискорення сили тяжіння на осі ортогональної системи координат:

$$a = K^{-1}[A - b_0], \tag{5}$$

де \hat{a} – оцінка проєкцій вектора прискорення на осі ортогональної системи координат, що зв'язана з осями чутливості тривісного АК.

Результати застосування методики

Виходячи з вимог викладеної методики, для отримання параметрів, необхідних для корекції вихідних сигналів тривісного АК, потрібно не менше чотирьох випробувань. Однак на практиці за рахунок можливості вибору мінімального часу проведення випробування завдяки аналізу параметрів, отриманих за методом варіації Алана (зокрема, параметрів шуму квантування) [16], досягається можливість збільшити кількість випробувань за час штатної процедури калібрування. Надмірна кількість випробувань забезпечує можливість одержання більш оптимальних оцінок детермінованих параметрів тривісного АК.

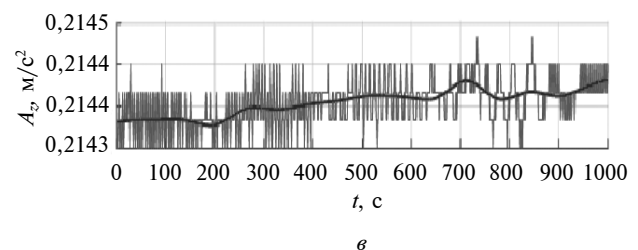
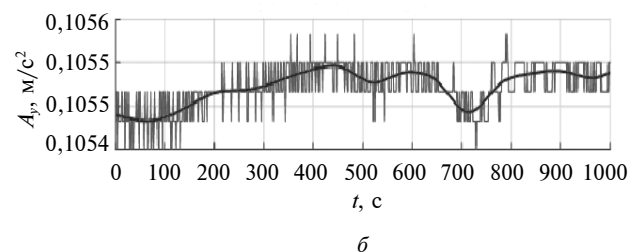
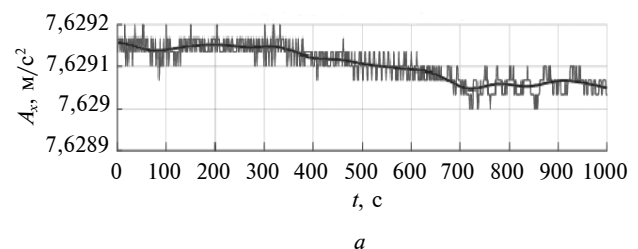


Рис. 2. Вихідні сигнали тривісного АК, зняті під час одного з випробувань на тривісному поворотному столі: а – канал x, б – канал y, в – канал z

Експериментальне відпрацювання методики проводилося в лабораторних умовах з використанням триступеневого поворотного стола на нерухомій основі, встановленій на розв'язаному фундаменті. Дослідження за цією методикою проводилися для трьох тривісних блоків із компенсаційними маятниковими акселерометрами. При калібруванні кожного з блоків тривісних АК проводилося 12 випробувань для різних кутових орієнтацій поворотного стола триступеневого стенда. Під час кожного з випробувань накопичувались та зберігались для подальшої обробки вихідні сигнали з інформаційних каналів тривісного АК (рис. 2).

Для перевірки ефективності методу корекції в кожному випробуванні була проведена оцінка модуля прискорення сили тяжіння g до корекції вихідних сигналів і після застосування корегуючої ланки (7):

$$\hat{g}_i = \sqrt{M\{A_{xi}\}^2 + M\{A_{yi}\}^2 + M\{A_{zi}\}^2},$$

$$\hat{g}_i = \sqrt{M\{\hat{a}_{xi}\}^2 + M\{\hat{a}_{yi}\}^2 + M\{\hat{a}_{zi}\}^2},$$

де \hat{g}_i – оцінка модуля прискорення сили тяжіння g до корекції вихідних сигналів, \hat{g}_i – після корекції, а індекс i вказує на номер випробування, в якому були отримані значення.

На рис. 3 показані результати розрахунку модуля прискорення сили тяжіння g для кожного з 12 випробувань до і після корекції вихідних сигналів одного з досліджуваних тривісних АК коректуючою ланкою (7).

Як видно, до корекції вихідні сигнали тривісного АК значною мірою спотворювалися за

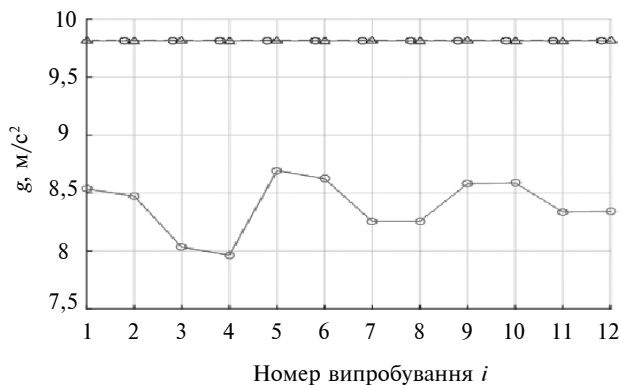


Рис. 3. Результати визначення модуля прискорення сили тяжіння за вихідними сигналами тривісного АК: \circ – значення g_e , отримане до корекції вихідного сигналу, \triangle – значення g_e , отримане після корекції, $---$ – математичне сподівання оцінки g , \bigcirc – еталонне значення модуля вектора g

рахунок детермінованих похибок. Зокрема, за допомогою рис. 2 можна оцінити вплив зсуву нулів і помилок масштабних коефіцієнтів на похибку визначення еталонного значення модуля g до калібрування. Як видно з рис. 3, математичне сподівання встановлених значень модуля g після калібрування практично збігається з його еталонним значенням (у цьому випадку різниця цих величин становить $3,2 \cdot 10^{-9}$ м/с²), що дає змогу зробити висновок про правильність вибраного алгоритму визначення зміщення нулів за цією методикою.

Основним параметром оцінки точності калібрування за використовуваною методикою вибрана нестабільність визначення еталонної величини у вигляді середньоквадратичного відхилення. На рис. 4, 5 наведені відносні нестабільності визначення модуля вектора g до і після калібрування одного зі зразків досліджуваних тривісних АК.

У таблиці зібрані оцінки точності калібрування на основі вимірювання модуля вектора g .

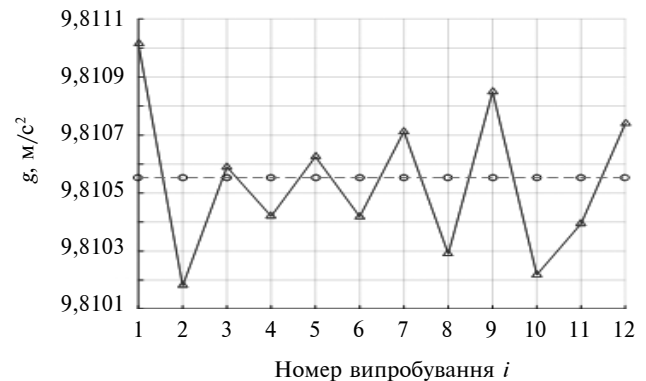


Рис. 4. Результати визначення модуля прискорення сили тяжіння відносно його еталонного значення: \triangle – значення g_e , отримане після корекції, \bigcirc – еталонне значення модуля вектора g , $---$ – середнє значення g_e

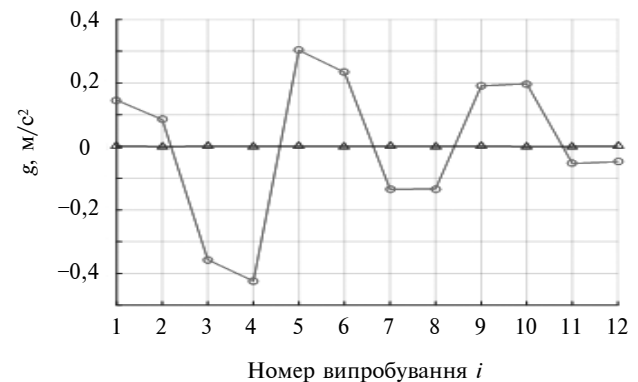


Рис. 5. Нестабільність визначення абсолютної величини вектора g : \circ – без корекції ($\sigma = 0,20667$), \triangle – після корекції ($\sigma = 0,00033$)

Таблиця. Результати калібрування тривісних блоків АК

$ M\{\hat{g}_n\} - g $ (м/с ²)	$\delta_{\hat{g}}$ (м/с ²)	$\delta_{\hat{g}}$ (м/с ²)
Тривісний блок АК № 1		
3,21e-09	0,21	3,26e-04
2,83e-09	0,21	2,89e-04
1,91e-08	0,21	8,04e-04
Тривісний блок АК № 2		
1,83e-08	0,06	7,38e-04
7,42e-09	0,06	2,26e-04
2,34e-08	0,06	3,45e-04
Тривісний блок АК № 3		
3,13e-08	0,17	9,75e-04
3,41e-09	0,17	4,18e-04
1,10e-09	0,17	3,68e-04

Висновки

Після корекції вихідних сигналів тривісного АК за допомогою параметрів, що були отримані калібруванням за викладеною методикою, похибка вимірювання еталонної величини не перевищує допустиму похибку для АК такого типу. Отримані оцінки точності калібрування дають змогу зробити висновок про правильність вибраних рівнянь для моделювання вихідних сигналів тривісного АК. Висока ефективність алгоритму підтверджена експериментальними даними для декількох тривісних блоків акселерометрів через проведення для кожного з них трьох калібрувань.

На основі алгоритму корекції (7) вихідного сигналу тривісного АК можна спроектувати

ефективну коректувальну ланку, що не вимагає від блоків перетворення сигналів акселерометрів значної обчислювальної потужності.

Результати обробки експериментальних даних за наведеною методикою показали, що, незважаючи на досить довгий інтервал часу між калібруваннями (від 2 до 11 днів), кожен із тривісних блоків АК зберігає характерні особливості графіків розподілу похибок визначення еталонної величини.

Надалі планується провести дослідження для підтвердження сталої складової похибки вихідних сигналів залежно від проекції еталонної величини на певні осі тривісного блока АК.

Список літератури

1. *Метрологія*. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів: ДСТУ 3989–2000. – Чинний від 25.09.2000. – К.: Держстандарт України, 2000. – 65 с.
2. *Avrutov V.* On scalar calibration of an inertial instrument cluster // *Innovations and Technologies New*. – 2011. – 2, № 11. – P. 22–30.
3. *Аврутов В.В., Головач С.В., Мазена Т.Ю.* О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля // XIX Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: Сборник докладов. – СПб, 2012. – С. 113–118.
4. *Аврутов В.В., Головач С.В.* Скалярный метод контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля // *Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування*. – 2014. – Вип. 48. – С. 14–20.
5. *Лакоза С.Л., Мелешко В.В.* Скалярная калибровка акселерометров низкой и средней точности // *Радиооптика*. – 2015. – № 1. – С. 9–28.
6. *Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем* / Е.А. Измайлов, С.Н. Лепе, А.В. Молчанов, Е.Ф. Поликовский // XV Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: Сборник докладов. – СПб. 2008. – С. 145–154.
7. *Егоров Ю.Г., Мьинт Х.Н.* Синтез программ калибровки блока акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // *Труды ФГУП НПЦАП. Системы и приборы управления*. – 2014. – № 4. – С. 79–86.

8. Попов Е.А. Программы калибровки триады акселерометров // XVI Конф. молодых ученых “Навигация и управление движением”: Тез. докл., 11–14 марта 2014 г., СПб. – СПб., 2014. – Докл. № 91. – Режим доступа: <http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2014/progr>.
9. Sheng-Chih Shen, Chia-Jung Chen, Hsin-Jung Huang. A new calibration method for low cost mems inertial sensor module // J. Marine Sci. Technol. – 2010. – **18**, № 6. – P. 819–824.
10. Panahandeh G., Skog I., Jansson M. Calibration of the accelerometer triad of an inertial measurement unit, maximum likelihood estimation and cramer-rao bound // Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sept. 15–17, 2010, Zurich, Switzerland. – P. 1–6.
11. Avrutov V. Scalar method of fault diagnosis of inertial measurement unit // Advances in Aerospace Eng. – 2015. – **2015**, article ID 264564. – 10 p.
12. Avrutov V. Scalar diagnostics of the inertial measurement unit // Int. J. Intelligent Systems and Applications. – 2015. – **11**. – P. 1–9. – Available: <http://www.mecs-press.org/ijisa/ijisa-v7-n11/IJISA-V7-N11-1.pdf>
13. Черняк М.Г., Палюшок В.А. Спосіб калібрування тривісного блока навігаційних акселерометрів на одновісному поворотному стенді // Механіка гіроскопічних систем. – 2013. – Вип. 26. – С. 5–15.
14. Allan D. Statistics of atomic frequency standards // Proc. IEEE. – 1966. – **54**, № 2. – P. 221–230.
15. Walid A.-H. Accuracy enhancement of integrated MEMS-IMU/GPS systems for land vehicular navigation applications: Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, UCGE Report no. 20207, 2005.
16. Головач С.В. Експериментальне дослідження характеристик лазерного гіроскопа // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2014. – Вип. 47. – С. 33–38.

References

1. Metrology. Calibration of Measuring Instruments. Main Provisions, Organization, Procedure and Presentation of Results, Ukrainian Standard 3989–2000, 2000 (in Ukrainian).
2. V. Avrutov, “On scalar calibration of an inertial instrument cluster”, *Innovations and Technologies New*, vol. 2, no. 11, pp. 22–30, 2011.
3. V.V. Avrutov et al., “About scalar calibration for block of gyroscopes and accelerometers”, in *Proc. 19th Saint Petersburg Int. Conf. Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, Russia, 2012, pp. 113–118 (in Russian).
4. V. Avrutov and S. Golovach, “The scalar method of quality monitoring and diagnostics of the inertial measurement unit”, *Visnyk NTUU “KPI”. Ser. Pryladobuduvannya*, no. 48, pp. 14–20, 2014 (in Russian).
5. S.L. Lakoza and V.V. Meleshko, “Scalar Calibration of low and medium accuracy accelerometers”, *Radiooptika*, no. 1, pp. 9–28, 2015 (in Russian).
6. E.A. Izmaylov et al., “Scalar method of calibrating and balancing the strapdown inertial navigation systems”, in *Proc. 15th Int. Conf. Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, 2008, pp. 145–154 (in Russian).
7. Yu.G. Egorov and H.N. Myint, “Synthesis of the programs for calibrating the accelerometers unit in the strapdown inertial navigation system”, *Trudy FGUP “NPTsAP”. Sistemy i Pribory Upravlenniya*, no. 4, pp. 79–86, 2014 (in Russian).
8. E.A. Popov, “Calibration programs for accelerometer’s triad”, in *Proc. 16th Conf. Navigation and Movement Control*, St. Petersburg, Russia, 2014, no. 91. Available: <http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2014/progr>.
9. Sheng-Chih Shen et al., “A new calibration method for low cost mems inertial sensor module”, *J. Marine Sci. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 819–824, 2010.
10. G. Panahandeh et al., “Calibration of the accelerometer triad of an inertial measurement unit, maximum likelihood estimation and cramer-rao bound”, in *Proc. Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, 2010, pp. 1–6.
11. V. Avrutov, “Scalar method of fault diagnosis of inertial measurement unit”, *Advances in Aerospace Eng.*, vol. 2015, Article ID 264564, 10 p., 2015.
12. V. Avrutov, “Scalar diagnostics of the inertial measurement unit”, *Int. J. Intelligent Systems and Applications*, vol. 11, pp. 1–9, 2015. Available: <http://www.mecs-press.org/ijisa/ijisa-v7-n11/IJISA-V7-N11-1.pdf>
13. M. Chernyak and V. Palyushok, “The method of calibration triaxial accelerometer navigation unit on the uniaxial rotary table”, *Mexanika Giroskopichnyx System*, vol. 26, pp. 5–15, 2013 (in Ukrainian).
14. D. Allan, “Statistics of atomic frequency standards”, *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 221–230, 1966.
15. A.-H. Walid, “Accuracy enhancement of integrated MEMS-IMU/GPS systems for land vehicular navigation applications”, Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, UCGE Report no. 20207, 2005.2005.
16. S.V. Golovach, “Experimental study of the laser gyroscope characteristics”, *Visnyk NTUU “KPI”. Ser. Pryladobuduvannya*, vol. 47, pp. 33–38, 2014 (in Russian).

В.В. Аврутов, С.В. Головач, О.М. Сапегін, М.Ю. Хутко

МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ І КОРЕКЦІЇ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ТРИВІСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Проблематика. Калібрування є важливим етапом роботи при введенні в експлуатацію таких навігаційних датчиків, як акселерометри.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження можливості використання методу калібрування та корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра.

Методика реалізації. Для роботи з моделями вихідних сигналів застосовуються матричні методи лінійної алгебри. Зокрема, для визначення невідомих параметрів моделі використано метод найменших квадратів. Алгоритм корекції вихідних сигналів представлено у вигляді матричного запису розв'язку системи лінійних рівнянь. Для оцінки ефективності корекції вихідних сигналів використовувались такі методи математичної статистики, як середньоквадратичне відхилення та математичне сподівання.

Результати дослідження. Отримано розрахункові формули для визначення параметрів калібрування, розроблено коректувальну ланку для вихідних сигналів тривісного акселерометра. Організовано експериментальні калібрування та опрацьовано отримані дані за допомогою алгоритму калібрування та коректувальної ланки. Приведено результати досліджень для кількох дослідних зразків тривісних акселерометрів.

Висновки. Використання калібрувальних коефіцієнтів, що поєднують в собі похибки масштабних коефіцієнтів та неортогональності осей дає змогу значно зменшити обчислювальне навантаження на електронні блоки обробки сигналів та отримувати вихідні сигнали із задовільною точністю.

Ключові слова: навігаційні датчики; акселерометри; калібрування; корекція сигналів; варіація Алана.

В.В. Аврутов, С.В. Головач, О.М. Сапегін, М.Ю. Хутко

МЕТОД КАЛИБРОВКИ И КОРРЕКЦИИ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ТРЕХОСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Проблематика. Калибровка является важным этапом работы при введении в эксплуатацию таких навигационных датчиков, как акселерометры.

Цель исследования. Целью работы является исследование возможности использования метода калибровки и коррекции выходных сигналов трехосного акселерометра.

Методика реализации. Для работы с моделями выходных сигналов применяются матричные методы линейной алгебры. В частности, для определения неизвестных параметров модели использован метод наименьших квадратов. Алгоритм коррекции выходных сигналов приведен в виде матричной записи решения систем линейных уравнений. Для оценки эффективности коррекции выходных сигналов использовались такие методы математической статистики, как среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание.

Результаты исследования. Получены расчетные формулы для определения параметров калибровки, разработано корректирующее звено для выходных сигналов акселерометра. Организованы экспериментальные калибровки и обработаны полученные данные с помощью алгоритма калибровки и корректирующего звена. Приведены результаты исследований для нескольких исследуемых образцов трехосных акселерометров.

Выводы. Использование калибровочных коэффициентов, которые объединяют в себе погрешности масштабных коэффициентов и неортогональности осей, позволяет значительно уменьшить вычислительную нагрузку на электронные блоки обработки сигналов и получать выходные сигналы с удовлетворительной точностью.

Ключевые слова: навигационные датчики; акселерометры; калибровка; коррекция сигналов; вариация Аллана.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
23 жовтня 2015 року