

УДК 681.3; 531.749.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНКЛИНОМЕТРА НА ОСНОВЕ ТРЕХОСНОГО МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

М. С. Люшнина, магистрант кафедры радиотехнических систем РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0007-5741-3147, e-mail: maria.lyushnina@yandex.ru

Е. С. Штрунова, к.т.н, доцент кафедры радиотехнических систем РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-1878-8011, e-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru

Цель работы – разработка математической модели устройства измерения углового отклонения объекта от заданной угловой ориентации на основе цифрового трехосного микроэлектромеханического акселерометра. Входными данными модели являются массивы значений двух углов Эйлера – крена и тангажа, – описывающих динамику изменения углового положения объекта интереса. Приведены аналитические выражения, которые описывают сигналы имитатора трехосного микроэлектромеханического акселерометра с цифровыми выходами и учитывают наличие постоянных смещений, различные масштабных коэффициентов по осям чувствительности, фликкер-шум сенсора и эффекты квантования. Рассмотрен алгоритм вычисления модуля среднего за время наблюдения углового отклонения $\Delta\alpha_{cp}$ от заданной угловой ориентации. Обоснован выбор минимальной разрядности аналого-цифрового преобразователя акселерометра $N_{АЦП} \geq 10$ при динамическом диапазоне $D = 4g$. Показано, что при выполнении определенных условий (максимальный по модулю элемент вектора постоянных смещений – не более 0,03) возможен отказ от выполнения процедуры калибровки трехосного акселерометра, если допустима относительная ошибка измерения углового отклонения от заданной угловой ориентации не более 5 %.

Ключевые слова: MEMS акселерометр, углы Эйлера, инклинометр, модуль углового отклонения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-58-65

Введение

Инклинометры, т.е. устройства для измерения угла отклонения объекта от вектора ускорения свободного падения, широко применяются в различных областях: в строительстве – для контроля угловых отклонений малоподвижных объектов (несущие элементы конструкций здания, стволы шахт, мосты, плотины и др. [1]), в медицине – для обнаружения факта падений пациентов в лечебных учреждениях [2], в задачах контроля правильности выполнения реабилитационных упражнений [3], в бесплатформенных инерциальных навигационных системах – в составе чувствительных элементов контура управления системы определения угловой ориентации [4, 5]. В данной работе авторами рассмотрено применение трехосного микроэлектромеханического (MEMS) акселерометра (ТМА) как сравнительно недорогого инклинометрического устройства для определения углового положения платформы тренажера-балансира для оценки качества удержания равновесия – например строго горизонтального положения платформы тренажера.

Предполагается, что для задачи измерения углового отклонения нормали к плоскости платформы тренажера-балансира от вертикали допустимая абсолютная погрешность измерений угла составляет доли градуса, т.е. выбор в качестве чувствительного элемента инклинометра только ТМА позволяет обеспечить указанное требование. Поскольку важным этапом проектирования любых измерительных устройств является построение их имитационной модели, то актуальна задача разработки математической модели выходных сигналов ТМА [6, 7].

Цель работы – разработка математической модели выходных сигналов инклинометра на основе цифрового ТМА (ЦТМА).

Математическая модель выходных сигналов трехосного MEMS акселерометра

Основными источниками погрешностей ТМА являются постоянные смещения, т.е. ненулевые амплитуды выходных сигналов по каждой из осей чувствительности при нулевой проекции ускорения на данную ось, «просачивание» сигнала из соседнего канала, вызванное взаимной неортогональностью осей чувствительности, отличный от единицы коэффициент масштабирования выходного сигнала по каждой оси и собственные шумы [8].

Математическая модель выходных сигналов ТМА в состоянии покоя может быть представлена [6, 7] в следующем виде:

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{K}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{g}_i + \mathbf{b}_i + \mathbf{n}_i, \quad (1)$$

где $\mathbf{a}_i = [a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}]^T$ и $\mathbf{g}_i = [g_{xi}, g_{yi}, g_{zi}]^T$ – соответственно измеренные и действующие проекции вектора ускорения свободного падения g на оси чувствительности ТМА в каждый момент времени $i = 0, 1, \dots, N-1$, где N – количество отсчетов ускорения; \mathbf{K} – диагональная матрица масштабных коэффициентов размером 3×3 ; \mathbf{T} – матрица коррекции размером 3×3 , описывающая неортогональность осей чувствительности; $\mathbf{b}_i = [b_{xi}, b_{yi}, b_{zi}]^T$ – вектор постоянных смещений; $\mathbf{n}_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]^T$ – вектор отсчетов собственного фликкер-шума ТМА.

Введем дополнительные ограничения на разработку модели:

1) выходные сигналы ТМА обеспечивают измерение нормированного к g ускорения, т.е. $\|\mathbf{g}_i\| = 1$, где $\|\cdot\|$ – обозначение оператора вычисления два-нормы вектора;

2) оси чувствительности ТМА строго ортогональны, т.е. $\mathbf{T} = \mathbf{E}$, где \mathbf{E} – единичная матрица размером 3×3 ;

3) постоянные смещения ТМА в течение временного интервала выполнения измерений не изменяются (справедливо при постоянной температуре сенсора [9]): $\mathbf{b}_i = \mathbf{b} = [b_x, b_y, b_z]^T$.

С учетом принятых ограничений перепишем (1) в виде:

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{K}\mathbf{g}_i + \mathbf{b} + \mathbf{n}_i. \quad (2)$$

Примем следующую ориентацию осей чувствительности системы координат $OXYZ$, связанной с ТМА: ось OX – вперед, ось OY – влево, ось OZ – вверх. Указанная ориентация осей характерна для большинства популярных микросхем ТМА потребительского класса точности.

Определим матрицы поворота по крену (вокруг оси OX – угол φ_{xi}) и тангажу (вокруг оси OY – угол φ_{yi}) в i -й момент времени:

$$\mathbf{R}_x(\varphi_{xi}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{xi} & -\sin \varphi_{xi} \\ 0 & \sin \varphi_{xi} & \cos \varphi_{xi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_y(\varphi_{yi}) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{yi} & 0 & \sin \varphi_{yi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{yi} & 0 & \cos \varphi_{yi} \end{bmatrix}.$$

Тогда истинное значение проекций вектора ускорения свободного падения g на оси чувствительности ТМА:

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{R}_x(\varphi_{xi})\mathbf{R}_y(\varphi_{yi})[0, 0, -1]^T = [-\sin \varphi_{yi}, \cos \varphi_{yi} \sin \varphi_{xi}, -\cos \varphi_{yi} \cos \varphi_{xi}]^T. \quad (3)$$

Введя для компактности аналитических выражений обозначения углов Эйлера $\varphi_i = \varphi_{xi}$, $\theta_i = \varphi_{yi}$, получим

$$\mathbf{g}_i = [-\sin \theta_i, \cos \theta_i \sin \varphi_i, -\cos \theta_i \cos \varphi_i]^T. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (2) позволяет симитировать выходные значения ТМА для углов Эйлера φ_i и θ_i .

Отсчеты фликкер-шума \mathbf{n}_i ТМА по каждой из трех его осей чувствительности в модели имитируются с помощью трех формирующих фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Каждый фильтр представляет собой каскадное соединение четырёх пропорционально-интегрирующих фильтров первого порядка с разностными уравнениями [10]:

$$x_n^{(2)} = y_n^{(1)} = \frac{1}{3}x_n^{(1)} - \left(\frac{1457}{4374}\right)x_{n-1}^{(1)} + \left(\frac{4373}{4374}\right)y_{n-1}^{(1)},$$

$$\begin{aligned}
 x_n^{(3)} = y_n^{(2)} &= \frac{1}{3}x_n^{(2)} - \left(\frac{161}{486}\right)x_{n-1}^{(2)} + \left(\frac{485}{486}\right)y_{n-1}^{(2)}, \\
 x_n^{(4)} = y_n^{(3)} &= \frac{1}{3}x_n^{(3)} - \left(\frac{17}{54}\right)x_{n-1}^{(3)} + \left(\frac{53}{54}\right)y_{n-1}^{(3)}, \\
 y_n^{(4)} &= \frac{1}{3}x_n^{(4)} - \frac{1}{6}x_{n-1}^{(4)} + \left(\frac{5}{6}\right)y_{n-1}^{(4)},
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

на вход которых поступает белый гауссов шум.

Моделирование работы инклинометра на основе ТМА

На основе симитированных результатов измерений ТМА \mathbf{a}_i модуль углового отклонения платформы от заданной угловой ориентации (рисунок 1) в каждый момент времени $i = 0, 1, \dots, N-1$ определяется по следующему алгоритму:

1) вычисление векторного произведения $\Delta_i = \mathbf{e} \times \mathbf{a}_i$, где \mathbf{e} – вектор, задающий эталонное угловое положение, а « \times » – обозначение оператора вычисления векторного произведения векторов;

2) расчет текущего модуля углового отклонения от эталонной угловой ориентации:

$$\Delta\alpha_i = |\arcsin\{\|\Delta_i\| / (\|\mathbf{e}\| \|\mathbf{a}_i\|)\}|; \tag{6}$$

3) расчет среднего за время наблюдения модуля углового отклонения от эталонной угловой ориентации:

$$\Delta a_{cp} = \frac{1}{N} \sum_i \Delta\alpha_i. \tag{7}$$

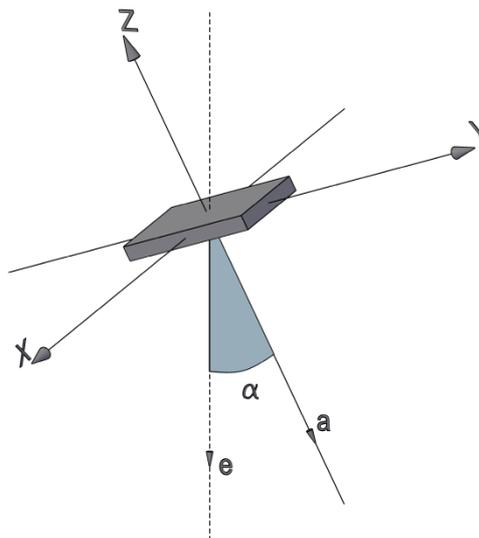


Рисунок 1 – Иллюстрация к принципу измерения текущего отклонения от эталонной угловой ориентации

Figure 1 – Illustration to the principle of measuring current deviation from reference angular orientation

На рисунке 2 приведены результаты имитационного моделирования работы инклинометра с ТМА для следующих параметров:

– колебания платформы по крену φ_i и тангажу θ_i описываются гармоническим законом – синусоидой с нулевой начальной фазой;

– период дискретизации сигналов ТМА $T_d = 10$ мс (значение по умолчанию для большинства ЦТМА потребительского класса точности);

– частоты изменения углового положения по крену φ и тангажу θ соответственно $f_\varphi = 1$ Гц и $f_\theta = 0,25$ Гц;

– амплитуды угловых отклонений по тангажу и крену равны 5° ;

- матрица масштабных коэффициентов $\mathbf{K} = \mathbf{E}$;
- вектор постоянных смещений $\mathbf{b} = [-0,03, 0,02, -0,06]^T$;
- фликкер-шум с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{ш}^2 = 0,0001$;
- динамический диапазон измерений ТМА: $D = 4g (\pm 2g)$.

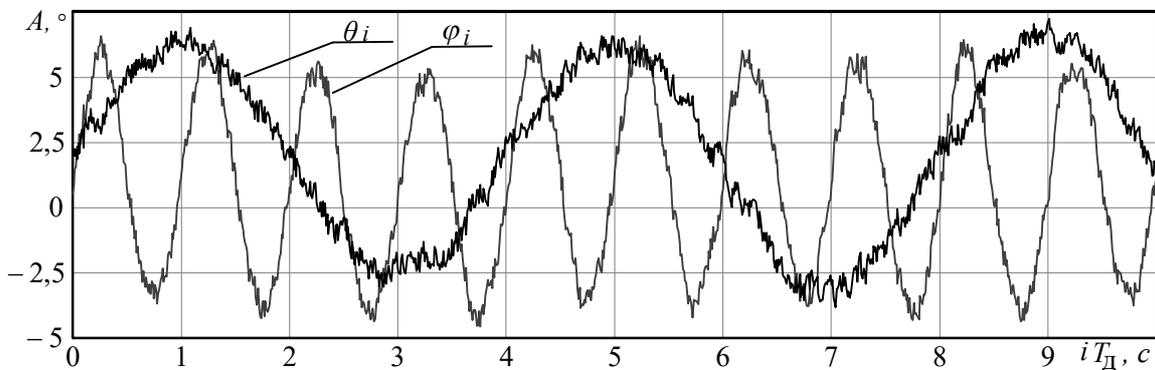


Рисунок 2 – Сымитированные результаты измерений ТМА
Figure 2 – Simulated MEMS-accelerometer measurements

Для разработки имитатора сигналов ЦТМА выход модели сигналов ТМА (2) подключается к квантователю уровней, параметрами которого являются разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) $N_{АЦП}$ и цена младшего значащего разряда $LSB = D/2^N$ (обозначение LSB – от англ. «*least significant bit*», младший значащий бит).

Пример вычисления по сигналам ЦТМА значений углового отклонения платформы по крену $\varphi_{измi}$ и тангажу $\theta_{измi}$ по формулам

$$\varphi_{измi} = -atan2(a_{yi}, a_{zi}), \theta_{измi} = -atan2[a_{xi}, (a_{yi}^2 + a_{zi}^2)^{1/2}], \tag{8}$$

где

$$atan2(y, x) = \begin{cases} arctg(y/x), & x > 0, \\ arctg(y/x) + \pi, & x < 0 \text{ и } y > 0, \\ arctg(y/x) - \pi, & x < 0 \text{ и } y < 0, \\ \pi/2, & x = 0 \text{ и } y > 0, \\ -\pi/2, & x = 0 \text{ и } y < 0, \\ \text{не определена,} & x = 0 \text{ и } y = 0, \end{cases} \tag{9}$$

и разрядностью АЦП $N_{АЦП} = 8$ приведен на рисунке 3.

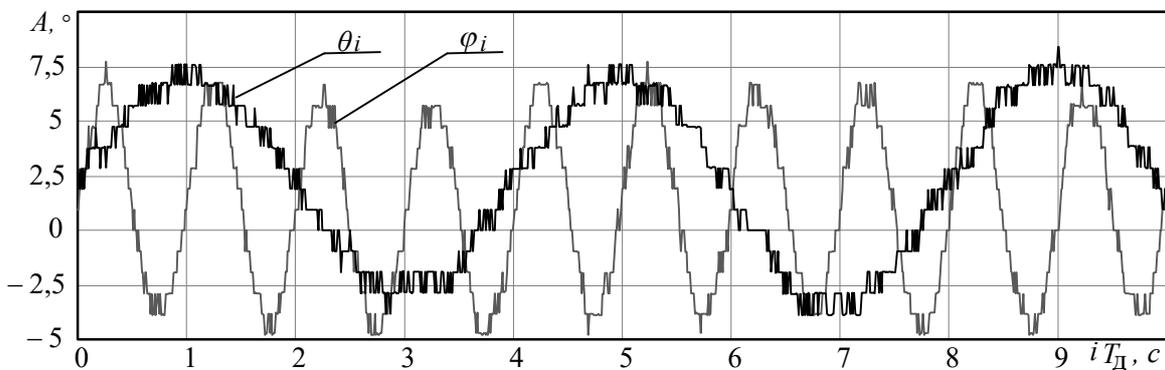


Рисунок 3 – Результаты измерения углового положения платформы по сигналам ЦТМА при $N_{АЦП} = 8$
Figure 3 – The results of measuring platform angular position by MEMS-accelerometer signals at $N_{ADC} = 8$

Результаты вычисления по (6) текущего модуля угла отклонения $\Delta\alpha_i$ нормали к плоскости платформы от эталонного положения – вертикали $\mathbf{e} = [0, 0, -1]^T$ – иллюстрируют зависимости на рисунке 4.

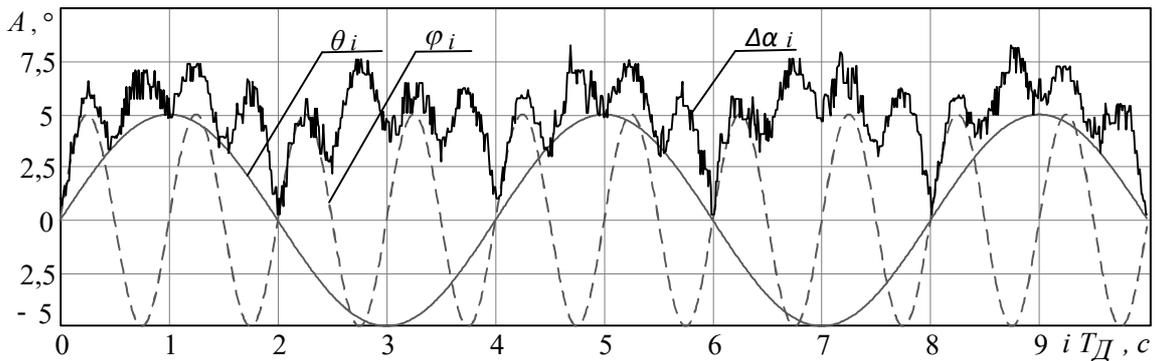


Рисунок 4 – Заданные колебания платформы по крену φ_i и тангажу θ_i и измеренный текущий угол отклонения от вертикали $\Delta\alpha_i$ при разрядности АЦП $N_{\text{АЦП}} = 8$
Figure 4 – Given platform oscillations in roll φ_i and pitch θ_i and measured current angle of deviation from vertical $\Delta\alpha_i$ at ADC bit depth $N_{\text{ADC}} = 8$

Эффекты квантования выходных сигналов ЦТМА инклинометра при различных разрядностях АЦП $N_{\text{АЦП}}$ иллюстрируют рисунки 5 и 6.

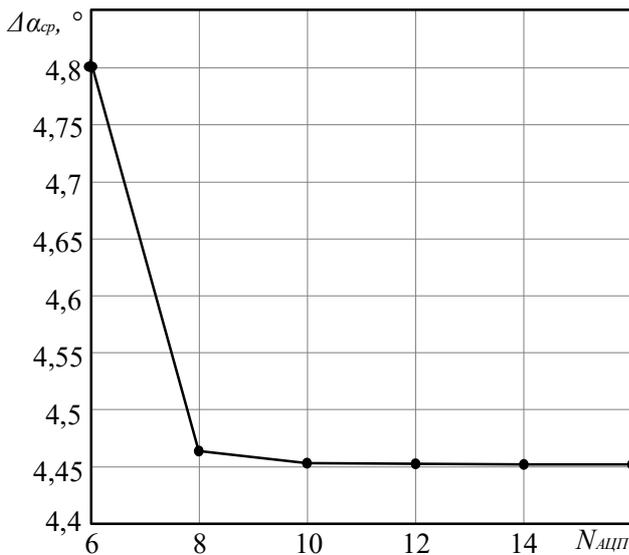


Рисунок 5 – Зависимость математического ожидания измеренного угла отклонения $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ от $N_{\text{АЦП}}$
Figure 5 – Dependence of mathematical expectation of measured deviation angle $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ from N_{ADC}

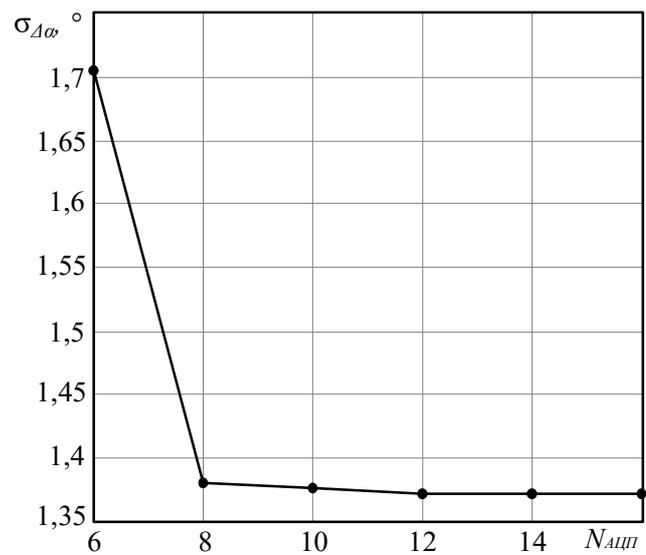


Рисунок 6 – Зависимость среднеквадратической ошибки измерения угла отклонения $\sigma_{\Delta\alpha}$ от $N_{\text{АЦП}}$
Figure 6 – Dependence of root-mean-square error of deviation angle measurement $\sigma_{\Delta\alpha}$ from N_{ADC}

Из зависимостей рисунков 5 и 6 следует, что для принятых значений динамического диапазона ТМА и дисперсии фликкер-шума для решения задачи оценивания средней величины углового отклонения следует рекомендовать выбор АЦП с разрядностью $N_{\text{АЦП}} \geq 10$. Таким образом, при выполнении условия $LSB < 0,1\sigma_{\text{ш}}$ дальнейшее увеличение разрядности АЦП ЦТМА инклинометра нецелесообразно.

Оценка угловых отклонений без предварительной калибровки

Если MEMS-акселерометр заранее откалиброван [11-13], то для вычисления $\Delta\alpha_i$ вместо текущего вектора измерений \mathbf{a}_i в (6) выполняется подстановка вектора с учетом коррекции постоянных смещений и масштабных коэффициентов:

$$\mathbf{a}_{\text{корр}} = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{a}_i - \mathbf{b}). \quad (10)$$

В то же время представляет практический интерес применение для расчетов по (6) и (7) именно некалиброванного ТМА, т.е. отказ от коррекции вектора измерений ТМА по (10).

В таблицу 1 сведены результаты оценивания по (6) и (7) среднего за время наблюдения углового отклонения $\Delta\alpha_{\text{срн}}$ при разрядности АЦП ЦТМА $N_{\text{АЦП}} = 12$ относительно:

1) заданной вектором \mathbf{e}_n требуемой угловой ориентации, где

$$\mathbf{e}_n = \mathbf{e} + \mathbf{b}_n, \quad \mathbf{b}_n = [0,01n, 0,01n, 0,01n]^T, \quad n = 0, 1, 2, \dots;$$

при этом предполагается, что до начала измерений платформа с ЦТМА установлена в положение с вектором нормали \mathbf{e} и вектор показаний \mathbf{e}_n оценен путем усреднения показаний ЦТМА \mathbf{a}_i ; обозначим эти измерения $\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e}_n)$;

2) заданной вектором \mathbf{e} требуемой угловой ориентации; обозначим эти измерения $\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e})$.

Таблица 1 – Зависимость $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ от вектора постоянных смещений для колебаний платформы согласно рисунку 2

Table 1 – Dependence of $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ on the vector of constant displacements for platform oscillations according to figure 2

n	\mathbf{b}_n	$\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e}_n), ^\circ$	$\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e}_n)/\Delta\alpha_{\text{ср}}(\mathbf{e})$	$\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e}), ^\circ$	$\Delta\alpha_{\text{срн}}(\mathbf{e})/\Delta\alpha_{\text{ср}}(\mathbf{e})$
0	$[0, 0, 0]^T$	4,722	1	4,722	1
1	$[0,01, 0,01, 0,01]^T$	4,771	1,010	4,702	0,996
2	$[0,02, 0,02, 0,02]^T$	4,816	1,019	4,778	1,012
3	$[0,03, 0,03, 0,03]^T$	4,862	1,029	4,950	1,048
4	$[0,04, 0,04, 0,04]^T$	4,909	1,039	5,219	1,105
5	$[0,05, 0,05, 0,05]^T$	4,954	1,049	5,587	1,183
6	$[0,06, 0,06, 0,06]^T$	4,996	1,058	6,064	1,284

Из численных данных таблицы 1 следует, что для проведения измерений углового отклонения платформы-балансира возможен отказ от процедуры калибровки ЦТМА. Например, он обоснован, если справедлива гипотеза о том, что максимальный по модулю элемент его вектора постоянных смещений не превосходит 0,03, что, как правило, характерно даже для ТМА потребительского класса точности [7]. При этом относительная ошибка измерения $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ даже без этапа предварительной оценки вектора \mathbf{e}_n увеличивается не более чем на 5 % по сравнению с откалиброванным ЦТМА, поскольку в (9) выполняется приближенное равенство $\arctg(x) \approx x$.

Заключение

Рассмотрена математическая модель инклинометра, которая позволяет оценить угловое положение платформы с помощью имитатора сигналов цифрового трехосного микроэлектромеханического акселерометра. В рамках упрощенной математической модели сигналов ТМА для решения задачи измерения среднего за время наблюдения углового отклонения обоснован выбор разрядности АЦП акселерометра $N_{\text{АЦП}}$ такой, чтобы выполнялось условие $LSB < 0,1\sigma_{\text{ш}}$: например, для динамического диапазона $D = 4g$ минимальная разрядность $N_{\text{АЦП}} \geq 10$. Показано, что для нормированных к величине модуля ускорения свободного падения g элементов вектора \mathbf{b} постоянных смещений, не превосходящих 0,03, возможен отказ от калибровки акселерометра, если допустима относительная погрешность измерений угла отклонения от вертикали не более 5 %.

Библиографический список

1. **Кочеткова А. С.** Применение инклинометра для подземных измерений // Наука и образование сегодня. 2021. № 7(66). С. 23-24.
2. **Ciuti G., Ricotti L., Menciaci A., Dario P.** MEMS Sensor Technologies for Human Centred Applications in Healthcare, Physical Activities, Safety and Environmental Sensing: A Review on Research Activities in Italy // Sensors. 2015, vol. 15, pp. 6441-6468.
3. **Ашапкина М. С., Алпатов А. В., Чекушин А. А.** Система поддержки выполнения реабилитационных упражнений коленного сустава на базе смартфона // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 8. С. 45-53.
4. **Матвеев В. В., Распопов В. Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
5. **Белокуров В. А.** Применение автоковариационного метода наименьших квадратов в инвариантной схеме угловой ориентации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 64. С. 9-16.
6. **Hung J. C., Thacher J. R., White H. V.** Calibration of accelerometer triad of an IMU with drifting Z-accelerometer bias // Proc. of the IEEE Aerospace and Electronics Conference NAECON-1989, vol. 1. Dayton, 1989, pp. 153-158.
7. **Kong X.** Inertial navigation system algorithms for low cost IMU. Sydney, 2000. 178 p.
8. **Mohd-Yasin F., Nagel D. J., Korman C.E.** Topical review: noise in MEMS // Measurement science and technology. 2010, vol. 21, pp. 1-22.
9. **Попова И. В.** Термостатирование микромеханических инерциальных датчиков // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 22-24.
10. **Barnes J. A., Jarvis S.** Efficient numerical and analog modeling of flicker noise processes // Technical note 604. 1971, pp. 1-22.
11. **Горянина К. И., Лукьянов А. Д.** Метод идентификации параметров эллипсоида чувствительности MEMS датчиков ориентации в стохастической постановке // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 4. С. 893-895.
12. **Холопов И. С.** Алгоритм упрощенной калибровки MEMS датчиков с шестью степенями свободы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 43. С. 49-54.
13. **Лютков И. А., Холопов И. С.** Сравнительный анализ двух методов нелинейной оптимизации в задаче калибровки трехосного MEMS акселерометра // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 15-22.

UDC 681.3; 531.749.1

MATHEMATICAL MODEL OF INCLINOMETER BASED ON THREE-AXIS MICROELECTROMECHANICAL ACCELEROMETER

M. S. Lushnina, master student, Department of Radio Engineering Systems, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0007-5741-3147, e-mail: maria.lyushnina@yandex.ru

E. S. Shtrunova, Ph.D (Tech.), associate professor, Department of Radio Engineering Systems, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-1878-8011, e-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru

The aim of the work is to develop a mathematical model of a device that measures angular deviation of an object from a given angular orientation based on digital three-axis microelectromechanical accelerometer. The model inputs are arrays of two Euler angles – roll and pitch – describing the dynamics of angular position of the object under consideration. The article contains analytical expressions that describe the signals of three-axis micro-electromechanical accelerometer imitator with digital outputs, and consider the presence of constant offsets, the difference of scale factors along sensitivity axes, flicker noise of the sensor, as well as quantization effects. An algorithm for calculating the modulus of average angular deviation $\Delta\alpha_{avg}$ from a given angular orientation during the observation period is considered. The choice of minimum digit capacity of analog-to-digital converter of the accelerometer is justified. The authors show that if certain

conditions are met (maximum modulo element of constant offsets vector is not more than 0.03), it is possible to ignore the calibration procedure of three-axis accelerometer, if valid relative measurement error is not higher than 5 %.

Keywords: MEMS accelerometer, Euler angles, inclinometer, angular deviation module.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-58-65

References

1. **Kochetkova A. S.** Primenenie inklinometra dlja podzemnyh izmerenij. *Nauka i obrazovanie segodnja*. 2021, no. 7(66). pp. 23-24. (in Russian).
2. **Ciuti G., Ricotti L., Menciassi A., Dario P.** MEMS Sensor Technologies for Human Centred Applications in Healthcare, *Physical Activities, Safety and Environmental Sensing: A Review on Research Activities in Italy*. *Sensors*. 2015, vol. 15, pp. 6441-6468.
3. **Ashapkina M. S., Alpatov A. V., Chekushin A. A.** Sistema podderzhki vypolnenija reabilitacionnyh uprazhnenij kolennogo sustava na baze smartfona. *Biomedicinskaja radioelektronika*. 2018, no. 8. pp. 45-53. (in Russian).
4. **Matveev V. V., Raspopov V. Ja.** *Osnovy postroenija besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem*. SPb.: GNC RF OAO «Koncern CNII «Jelektropribor», 2009. 280 p. (in Russian).
5. **Belokurov V. A.** Primenenie avtokovariacionnogo metoda naimen'shih kvadratov v invariantnoj sheme uglovoj orientacii. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 64. pp. 9-16. (in Russian).
6. **Hung J. C., Thacher J. R., White H. V.** Calibration of accelerometer triad of an IMU with drifting Z-accelerometer bias. *Proc. of the IEEE Aerospace and Electronics Conference NAECN-1989*, vol. 1. Dayton, 1989. pp. 153-158.
7. **Kong X.** Inertial navigation system algorithms for low cost IMU. Sydney, 2000. 178 p.
8. **Mohd-Yasin F., Nagel D. J., Korman C.E.** Topical review: noise in MEMS. *Measurement science and technology*. 2010, vol. 21. pp. 1-22.
9. **Popova I. V.** Termostatirovanie mikromehaničeskikh inercial'nyh datchikov. *Mikrosistemnaja tehnika*. 2001, no. 5, pp. 22-24. (in Russian).
10. **Barnes J. A., Jarvis S.** Efficient numerical and analog modeling of flicker noise processes. *Technical note 604*. 1971, pp. 1-22.
11. **Gorjanina K. I., Luk'janov A. D.** Metod identifikacii parametrov jellipsoida čuvstvitel'nosti MEMS datchikov orientacii v stohastičeskoi postanovke. *Mezhdunarodnyj studenčeskij nauchnyj vestnik*. 2017, no. 4, pp. 893-895. (in Russian).
12. **Kholopov I. S.** Algoritm uproshhennoj kalibrovki MEMS datchikov s šest'ju stepenjami svobody. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 43, pp. 49-54. (in Russian).
13. **Lyutkov I. A., Kholopov I. S.** Sravnitel'nyj analiz dvuh metodov nelinejnoj optimizacii v zadache kalibrovki trehosnogo MEMS akselerometra. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020, no. 71, pp. 15-22. (in Russian).