УДК 531.768 DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.4.035-046

## Ю. В. ФИЛАТОВ, А. М. БОРОНАХИН, В. Б. ДАО, В. Ч. ЛЕ, Л. Н. ПОДГОРНАЯ

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРИАДЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В РЕЖИМЕ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрена процедура исследования погрешностей триады микромеханических акселерометров (ММА), позволяющая сократить время испытаний относительно традиционных методов, а также оценить взаимное геометрическое положение датчиков в триаде. Предложенный подход состоит в исследовании статических характеристик датчиков в режиме колебательных угловых движений и позволяет оценить не только коэффициенты, характеризующие погрешности, в математической модели показаний акселерометров, но и место расположения триады акселерометров в закрытом корпусе инерциального измерительного модуля. Приведены результаты исследования погрешностей триады MMA.

Ключевые слова: инерциальная навигация, модель показаний, микромеханический акселерометр, двухосный испытательный стенд.

## Введение

На сегодняшний день инерциальные технологии применяются не только в традиционной области навигации и управления движением, но и в геодезии, топографии, гравиметрии, метрологии, логистике и др. [1]. Микромеханические инерциальные датчики являются ключевой развивающейся технологией для миниатюрных инерциальных навигационных систем.

Области применения микромеханических инерциальных датчиков непрестанно расширяются. Благодаря их малым габаритам, энергопотреблению и себестоимости формируется новый сегмент рынка миниатюрных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Микромеханические акселерометры обеспечивают широкий диапазон измерений и обладают точностными характеристиками ИНС среднего класса. Однако требования к точностям

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член международной общественной организация «Академия навигации и управления движением».

Боронахин Александр Михайлович. Доктор технических наук, профессор кафедры ЛИНС, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член международной общественной организация «Академия навигации и управления движением».

Дао Ван Ба. Кандидат технических наук. Инженер кафедры ЛИНС.

Ле Ван Чанг. Кандидат технических наук. Инженер кафедры ЛИНС.

Подгорная Людмила Николаевна. Кандидат технических наук, доцент кафедры ЛИНС.

инерциальных датчиков и систем на их основе при решении задач навигации и ориентации с каждым днем ужесточаются, что приводит к необходимости совершенствования методов их испытаний в целях получения достоверных математических моделей показаний, учитывающих условия дальнейшей эксплуатации.

Наиболее используемыми на сегодняшний день методами испытания акселерометров являются: методы с использованием вращающихся платформ (центрифуг), поворотов в гравитационном поле Земли (стандартный метод), линейно перемещающихся платформ [2], скоростной метод [3], скалярный метод испытаний 3-осных блоков (триад) взаимно ортогональных акселерометров [4]. К их основным недостаткам следует отнести: сложность конструкции; жесткие требования к начальной выставке; в ряде случаев отсутствие возможности оценивания углов взаимной неортогональности измерительных осей триады; значительное время подготовки и проведения испытания.

В первую очередь следует отметить тот факт, что триады ММА широко применяются на высокоманевренных объектах, характерной особенностью которых является непостоянство положения центра качания в приборной системе координат. Помимо этого, в большинстве случаев взаимное расположение ММА в триаде таково, что их оси чувствительности не пересекаются в одной точке. В случае использования трехосного ММА точка пересечения осей отстоит от начала приборной системы координат измерительного блока. Данные конструктивные особенности, характеризуемые радиус-векторами, должны оцениваться на стадии испытаний и учитываться в дальнейшем в алгоритмах БИНС.

Вышесказанное позволяет утверждать, что актуальной является разработка дополнительных процедур исследования погрешностей триады ММА, предполагающих проведение испытаний в условиях, близких к реальному режиму движения объекта [5]. При этом необходимо без потери точности, характерной для традиционного метода поворотов в гравитационном поле Земли [6], сократить время испытаний, что в свою очередь позволит снизить требования к точности начальной выставки стенда, а также с учетом термозависимости датчиков может быть полезно на стадии проектирования инерциальных измерительных модулей (ИИМ) в рамках пусконаладочных испытаний.

### Исследования погрешностей триады микромеханических акселерометров

В данной статье предлагается процедура исследования погрешностей триады акселерометров или трехосного акселерометра в составе ИИМ, при которой ИИМ устанавливается на платформу двухосного испытательного стенда (на априорно известном удалении от осей вращений), совершающего квазигармонические угловые колебания по обеим осям. Информация об угловом движении считывается с акселерометров и одновременно с угловых датчиков стенда и поступает в фильтр Калмана.

В отличие от работы [7], где применяют волоконно-оптические гироскопы, использование входящих в состав испытуемого ИИМ микромеханических гироскопов для контроля углового положения обеспечивает меньшую точность, чем использование информации с датчиков углов стенда. При правильном выборе амплитуд и периодов колебаний оптимальная фильтрация полученной информации позволяет оценить параметры акселерометров (масштабные коэффициенты, сдвиги нулей и углы неортогональностей измерительных осей), а также их расположение в ИИМ и неточность выставки стенда относительно плоскости горизонта.

При этом формирование квазигармонических угловых колебаний по обеим осям обеспечивает непрерывное изменение проекции ускорения на оси чувствительности в диапазоне  $\pm g$ , где g – гравитационное ускорение. В этом случае испытуемый ИИМ, установленный на платформу стенда, участвует в сложном движении, где за переносное принимается движение вокруг наружной оси, а за относительное – вокруг внутренней оси. Движение триады в географической системе координат  $O_s \xi \eta \zeta$  является абсолютным, ее ускорение определяется суммой проекции кажущегося ускорения, измеренного акселерометрами, и ускорения гравитационного поля Земли.

На рис. 1 изображен двухосный стенд с установленным на нем ИИМ, и введены следующие системы координат:

 $O_{S}x_{S}y_{S}z_{S}$  – система координат, связанная с основанием стенда;

*О<sub>s</sub>х*<sub>1</sub>*y*<sub>1</sub>*z*<sub>1</sub> – система координат, связанная с наружной (горизонтальной) осью стенда;

 $O_{s}x_{2}y_{2}z_{2}$  – система координат, связанная с внутренней осью стенда (с планшайбой); начало  $O_{s}$  находится в точке пересечения осей стенда;

*Охуг* – приборная система координат, начало которой расположено в центре инерционной массы трехосного акселерометра или, в случае исследования триады датчиков – в геометрическом центре ИИМ; оси направлены вдоль осей корпуса ИИМ;

 $\lambda_1, \lambda_2$  – углы разворотов вокруг наружной и внутренней осей стенда;

 $\Delta \psi, \Delta \theta$  – погрешности выставки стенда ( $O_{SV_SZ_S}$ ) в плоскости горизонта ( $O_{S}\eta\zeta$ );

 $\mathbf{R} = (x_2, y_2, z_2) -$ радиус-вектор, определяющий место расположения точки *O* в системе координат  $O_S x_2 y_2 z_2$ . Так как испытаниям подвергается трехосный MMA, конструктивно выполненный таким образом, что оси его пересекаются в одной точке – центре масс инерционной массы, может быть задан один радиус-вектор, характеризующий координаты центра ИИМ. В том же случае, когда исследуется триада одноосных MMA (см. [7]), следует учитывать возможность непересечения осей MMA, что является дополнительным источником погрешностей;

 $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2 (\ddot{\lambda}_1, \ddot{\lambda}_2)$  – угловые скорости (ускорения) вращений вокруг наружной и внутренней осей стенда.



Рис. 1. Кинематическая схема стенда и системы координат

В настоящей статье была использована математическая модель показаний триады акселерометров следующего вида [6]:

Гироскопия и навигация. Том 24, № 4 (95), 2016

$$\begin{bmatrix} W_{x}^{\text{np}} \\ W_{y}^{\text{np}} \\ W_{z}^{\text{np}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{z} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{y} & \beta_{z} \\ \alpha_{x} & 1 & -\gamma_{z} \\ -\beta_{x} & \gamma_{y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{x} \\ W_{y} \\ W_{z} \end{bmatrix} + \left[ K_{xx}W_{x} & K_{xy}W_{x} & K_{xz}W_{x} \\ K_{yx}W_{y} & K_{yy}W_{y} & K_{yz}W_{y} \\ K_{zx}W_{z} & K_{zy}W_{z} & K_{zz}W_{z} \end{bmatrix} \left[ W_{x} \\ W_{y} \\ W_{z} \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} W_{x}^{(0)} \\ W_{y}^{(0)} \\ W_{z}^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{x}^{\text{III}} \\ W_{y}^{\text{III}} \\ W_{z}^{\text{IIII}} \end{bmatrix}$$
(1)

где  $K_i$ , (i=x,y,z) – масштабные коэффициенты (мВ/g);  $K_{ii}$  – коэффициенты нелинейности выходных характеристик (1/g);  $K_{ij}$ ,  $(i\neq j)$  – коэффициенты перекрестных связей (1/g);  $W_i^{(0)}$  – сдвиги нулей (мВ);  $W_i^{np}$  – показания датчика (мВ);  $W_i$  – проекции действующего ускорения на оси связанной системы координат (единицы g);  $W_i^{m}$  – шумовая составляющая показаний (мВ);  $\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix}$  – линеаризованная матрица направляющих косинусов уг-

лов неортогональностей, характеризующих положение измерительных осей акселерометров относительно осей триады *Охуг* [рад].

Таким образом, за счет введения квазигармонических колебаний и при ненулевом радиус-векторе **R** вектор входных воздействий  $W_{xyz} = [W_x, W_x, W_x]^T$  (1) по осям приборной системы координат имеет вид

$$\mathbf{W}_{xyz} = C(\lambda_2)^{-1}C(\lambda_1)^{-1} \times \left[\dot{\boldsymbol{\lambda}}_1 \times (\dot{\boldsymbol{\lambda}}_1 \times \mathbf{R}) + \ddot{\boldsymbol{\lambda}}_1 \times \mathbf{R} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}_2 \times (\dot{\boldsymbol{\lambda}}_2 \times \mathbf{R}) + \ddot{\boldsymbol{\lambda}}_2 \times \mathbf{R} + 2\dot{\boldsymbol{\lambda}}_1 \times \mathbf{V}_r - \mathbf{g}\right],$$
(2)

где  $\dot{\lambda}_1 \times (\dot{\lambda}_1 \times \mathbf{R})$ ;  $\dot{\lambda}_2 \times (\dot{\lambda}_2 \times \mathbf{R})$  – нормальные ускорения при переносном и относительном движениях триады, соответственно;  $\ddot{\lambda}_1 \times \mathbf{R}$ ;  $\ddot{\lambda}_2 \times \mathbf{R}$  – касательные ускорения при переносном и относительном движениях триады, соответственно;  $2\dot{\lambda}_1 \times \mathbf{V}_r$  – ускорение Кориолиса;  $C(\lambda_1)$ ,  $C(\lambda_2)$  – матрицы переходов из  $O_{sx_1y_1z_1}$  в  $O_{sx_sy_sz_s}$  и из  $O_{sx_2y_2z_2}$  в  $O_{sx_1y_1z_1}$  соответственно;  $\mathbf{V}_r$  – скорость относительного движения триады акселерометров.

Следует отметить, что величина радиус-вектора **R**, характеризующего расстояние от точки  $O_S$  до центра инерционной массы трехосного акселерометра (точки O), может быть представлена суммой двух радиус-векторов: первый определяет расстояние от  $O_S$  до геометрического центра ИИМ, второй – от геометрического центра ИИМ до точки O. Первая составляющая известна из технической документации на стенд и ИИМ, вторая – представляется, как погрешность знания радиус-вектора  $\Delta \mathbf{R}$ .

В этом случае для решения задачи по оценке параметров математической модели (1) и расположения акселерометров в ИИМ достаточно реализовать угловые перемещения по следующему критерию:  $\lambda_1^{(0)} = 360^\circ$ ;  $\lambda_2^{(0)} = 90^\circ - ампли-$ туды угловых колебаний относительно наружной и внутренней осей стенда с

Х

периодами, соответствующими соотношению  $2T_1=5T_2$ , что обеспечивает прохождение триады через угловые положения, используемые в стандартном методе. При этом реализуется процедура оценки параметров математической модели акселерометров, обеспечивающая слабую зависимость от погрешности ориентации средства испытаний относительно плоскости горизонта согласно [6]. В случае если в состав ИИМ входит триада датчиков угловой скорости, то при задании значений периодов должны учитываться максимальные значения измеряемых угловых скоростей. Например, если максимальная угловая скорость 75 град/с, периоды колебаний относительно наружной и внутренней осей составят соответственно 30 и 12 с, тогда амплитуды угловых ускорений достигнут соответственно 15 и 25 град/с<sup>2</sup>, что необходимо учитывать при анализе методических погрешностей.

На рис. 2 приведена предлагаемая схема совместной обработки показаний триады ММА и ДУ испытательного стенда.

В блоке *Б1* вычисляются параметры движения (скорость V и перемещение S) точки *О* по показаниям ММА и ДУ. При этом показания ДУ используются в том числе для перепроекти-



Рис. 2. Схема совместной обработки показаний триады ММА и ДУ:ОФК – оптимальный фильтр Калмана;  $\hat{\mathbf{X}}$ – оценка вектора состояния

рования кажущегося ускорения, измеренного акселерометрами (**a**), на оси *O*<sub>5</sub>ξηζ:

$$\mathbf{a} = C(\Delta \Psi)C(\Delta \theta)C(\lambda_{1} + \Delta \lambda_{1})C(\lambda_{2} + \Delta \lambda_{2})A_{\alpha} (\mathbf{W} + \Delta \mathbf{W}) + \mathbf{g};$$
  

$$\mathbf{V} = \int_{t_{j-1}}^{t_{j}} \mathbf{a}dt + \mathbf{V}(t_{j-1}); \mathbf{S} = \int_{t_{j-1}}^{t_{j}} \mathbf{V}dt + \mathbf{S}(t_{j-1}),$$
(3))

где  $\Delta W$  – погрешности акселерометров в измерении задаваемых испытательным стендом ускорений W;  $A_{\alpha}$  – обратная матрица углов неортогональностей или матрица перехода от системы координат  $Oxyz \ \kappa O_{s}x_{2}y_{2}z_{2}$ ;  $\Delta\lambda_{1}$ ,  $\Delta\lambda_{2}$  – погрешности ДУ по наружной и внутренней осям испытательного стенда,  $C(\Delta \psi)$ ,  $C(\Delta \theta)$  – матрицы разворотов на углы  $\Delta \psi$  и  $\Delta \theta$ , соответственно;

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\psi & 0 \\ \Delta\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda_{1} - \sin\lambda_{1}(\Delta\lambda_{1} + \Delta\theta) & 0 & \sin\lambda_{1} + \cos\lambda_{1}(\Delta\lambda_{1} + \Delta\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\lambda_{1} - \cos\lambda_{1}(\Delta\lambda_{1} + \Delta\theta) & 0 & \cos\lambda_{1} - \sin\lambda_{1}(\Delta\lambda_{1} + \Delta\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -\alpha_{y}\cos\lambda_{2} - \beta_{z}\sin\lambda_{2} & \cos\lambda_{2} - \sin\lambda_{2}(\Delta\lambda_{2} - \gamma_{z}) & -\sin\lambda_{2} - \cos\lambda_{2}(\Delta\lambda_{2} - \gamma_{y}) \\ -\alpha_{y}\sin\lambda_{2} + \beta_{z}\cos\lambda_{2} & \sin\lambda_{2} + \cos\lambda_{2}(\Delta\lambda_{2} - \gamma_{z}) & \cos\lambda_{2} - \sin\lambda_{2}(\Delta\lambda_{2} - \gamma_{y}) \end{bmatrix} \cdot (\mathbf{W} + \Delta \mathbf{W}) + \mathbf{g}.$$

Из этого выражения следует:

1)  $\Delta \theta$  и  $\Delta \lambda_1$  можно объединять в одну суммарную погрешность  $\Delta \theta^c = \Delta \theta + \Delta \lambda_1$ , т.е. последовательность поворотов от  $O_S \xi \eta \zeta$  к  $O_S x_2 y_2 z_2$  имеет вид:

Гироскопия и навигация. Том 24, № 4 (95), 2016

$$\Delta \psi \rightarrow \underbrace{\Delta \theta \rightarrow \Delta \lambda_1}_{\Delta \theta^c} \rightarrow \lambda_1 \rightarrow \Delta \lambda_2 \rightarrow \lambda_2;$$

2) для того чтобы оценивались отдельные параметры  $\Delta\lambda_2$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma_z$ , требуется выполнение дополнительной процедуры. Например, основываясь на результатах контроля выставки платформы стенда в горизонт с помощью квадранта, а также при известном значении погрешности датчика угла стенда по внутренней оси ( $\Delta\lambda_2$ ), можно с известной точностью записать

$$\mathbf{z}_{\Delta \psi - \Delta \lambda_2} = \Delta \psi - \Delta \lambda_2 = 0$$
.

Линеаризовав выражение (3) методом варьирования, получаем линейное уравнение ошибок – связи погрешностей выработки параметров движения с погрешностями акселерометров и неточностью вводов начальных условий:

$$\Delta \mathbf{V} = \Delta \mathbf{a}, \ \Delta \mathbf{S} = \Delta \mathbf{V}$$

которое может быть представлено в векторно-матричной форме:  $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{w}$ , где  $\mathbf{w}$  – вектор возмущения;  $\mathbf{F}$  – матрица состояния;  $\mathbf{G}$  – матрица возмущения.

Основные составляющие погрешности ДУ испытательного стенда могут быть представлены в виде

$$\Delta \lambda_i = \Delta \lambda_i(0) + \Delta \lambda_i(\dot{\lambda}) + \Delta \lambda_i^{\rm III},$$

где  $\Delta \lambda_i(0)$  – систематическая погрешность;  $\Delta \lambda_i^{\rm m}$  – случайная составляющая погрешности;  $\Delta \lambda_i(\dot{\lambda})$  – динамическая погрешность, вносимая влиянием скорости вращения.

Решение задачи по оценке взаимного расположения акселерометров в триаде с обеспечением слабой зависимости к неточности выставки испытательного стенда [6] возлагается на ОФК, поэтому в вектор состояния, дополнительно к параметрам модели (1), вводятся: погрешности выставки стенда и погрешности ДУ ( $\Delta \psi$ ,  $\Delta \theta^{c}$ ,  $\Delta \lambda_{2}$ ); погрешность знания радиус-вектора  $\Delta \mathbf{R} = (\Delta x_{2}, \Delta y_{2}, \Delta z_{2})^{T}$ , определяющие положение центра инерционной массы трехосного акселерометра относительно начала приборной системы координат *Oxyz*:

$$\mathbf{X} = \left[\Delta V_i, \Delta S_i, \Delta \psi, \Delta \theta^{c}, \Delta \lambda_2, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2, \delta W_i^{(0)}, \delta K_i, \alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_z, \gamma_y, \gamma_z, K_{ij}\right]^{\mathrm{T}}.$$
 (5)

В блоке Б2 (см. рис. 2) вычисляются параметры движения точки O по показаниям ДУ и радиус-вектора **R** 

$$\mathbf{S}^{\mathcal{A}\mathcal{Y}} = C(\Delta \psi) \cdot C(\lambda_1) \cdot C(\lambda_2) \cdot \mathbf{R}; \ \mathbf{V}^{\mathcal{A}\mathcal{Y}} = \\ = C(\Delta \psi) \cdot \left[ \left( \dot{\boldsymbol{\lambda}}_1 + C(\lambda_1) \cdot \dot{\boldsymbol{\lambda}}_2 \right) \times \left( C(\lambda_1) \cdot C(\lambda_2) \cdot \mathbf{R} \right) \right]$$

При формировании вектора измерений ОФК используются:

- скоростное измерение:  $\mathbf{z}_{\mathbf{V}} = \mathbf{V} \mathbf{V}^{\mathbf{X}\mathbf{Y}}$ ;
- позиционное измерение:  $z_S = S S^{AV}$ ;
- дополнительное измерение:  $\mathbf{z}_{\Delta \psi \Delta \lambda_2} = \Delta \psi \Delta \lambda_2 = 0$ .

В этом случае вектор измерений имеет вид  $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_{\mathbf{V}}, \mathbf{z}_{\mathbf{S}}, \mathbf{z}_{\Delta \psi - \Delta \lambda_2}]^{\mathrm{T}}$ , а уравнение измерений традиционно представляется в векторно-матричной форме:  $\mathbf{Z} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{v}$ ,

где **H** – матрица измерений; **v** – вектор шумов измерений.

При анализе источников методических погрешностей предложенной процедуры необходимо учесть следующие оценки и допущения:

• дополнительное смещение нуля из-за вариации температуры окружающей среды:

$$\Delta W_{\rm T} = k_{\rm T} \Delta T = k_{\rm T} \dot{T} t \,,$$

где  $k_{\rm T}$  – тепловой дрейф сдвигов нулей акселерометров;  $\Delta T$  – изменение температуры за время испытания,  $\dot{T}$  – скорость изменения температуры; t – время испытания.

Для аналитической оценки с учетом выполнения требований по нормальным условиям, когда скорость изменения температуры не превышает 10 град/ч, за 1 мин дополнительный сдвиг нуля составит величину  $\Delta W_{\rm T} \approx 0.2 \,{\rm Mg}$  (здесь и далее под единицей мg имеется в виду  $g \cdot 10^{-3}$ ).

• влияние динамической погрешности ДУ испытательного стенда  $\Delta \lambda_i(\dot{\lambda})$ 

[8]

$$\Delta \lambda_i(\dot{\lambda}) = \dot{\lambda}_i(t) \cdot \tau$$
,

где τ – время задержки выходного сигнала ДУ. Эта погрешность приводит к погрешности измерения ускорения

$$\Delta W_{\Delta\lambda_i(\dot{\lambda})} = \Delta\lambda_i(\dot{\lambda})g = \tau \dot{\lambda}_i(t) \cdot g$$

В настоящее время при создании испытательных поворотных стендов нашли широкое применение фотоэлектрические преобразователи угла с  $\tau=10$  µс. Тогда, например, при  $\dot{\lambda} = 75$  град/с, дополнительная погрешность составит  $\Delta W_{\Delta\lambda_i(\dot{\lambda})} = 0,01$  мg.

погрешность, обусловленная использованием фильтра Калмана. В установившемся режиме оптимальный фильтр Калмана является стационарным, определяемым дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Тогда эта составляющая методической погрешности определяется погрешностью, внесенной при линеаризации.

Исходя из принятой математической модели, описывающей показания триады ММА, одна из составляющих («опущенная» малая второго порядка) проекции ускорения на ось чувствительности, например, *x*-акселерометра имеет вид

$$\begin{split} \Delta W_x^{\Pi} &= \sin \lambda_1 W_x \Big( -\alpha_y \cos \lambda_2 + \beta_z \cos \lambda_2 - \beta_z \sin \lambda_2 \Big) \Delta \lambda_2 + \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \gamma_y \Delta W_z + \\ &+ \Big( \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \Delta W_y \gamma_z + \sin \lambda_1 \cos \lambda_2 W_z \gamma_y \Big) \Delta \lambda_2 - \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \alpha_y \Delta W_x + \\ &+ \cos \lambda_1 \alpha_x \Delta W_y + \sin \lambda_1 \cos \lambda_2 \Big( \Delta \lambda_2 - \gamma_z \Big) \Delta W_y - \cos \lambda_1 \beta_x \Delta W_z - \sin \lambda_2 \Delta \lambda_2 \Delta W_z. \end{split}$$

В этом случае при углах неортогональностей осей чувствительностей акселерометров триады порядка 1°, суммарной погрешности ДУ испытательного стенда  $\Delta \lambda_2 = 30'$  и вариации сдвига нуля ММА относительно его паспортного значения  $\Delta W_i = 10$  мg погрешность линеаризации составит  $\Delta W_x^{T} = 0,2$  мg.

• погрешность, возникающая при непересечении осей вращения стенда. Если оси вращения стенда не пересекаются, то есть начало системы координат  $O_{s}x_{1}y_{1}z_{1}$  удалено от начала системы координат  $O_{s}x_{2}y_{2}z_{2}$  на величину  $\Delta z$ , изменится переносная составляющая ускорения, действующего на три-

Гироскопия и навигация. Том 24, № 4 (95), 2016

аду: нормальное ускорение примет вид  $\dot{\lambda}_1 \times (\dot{\lambda}_1 \times (\mathbf{R} + \Delta \mathbf{z}))$ , касательное –  $\ddot{\lambda}_1 \times (\mathbf{R} + \Delta \mathbf{z})$ . С учетом геометрии использованного испытательного стенда при расположении триады акселерометров на минимально возможном удалении от внешней оси  $y_1$  стенда 110 мм и максимально возможном удалении от внутренней оси  $x_2$  70 мм длина вектора **R** может составлять 130 мм. Исходя из технических характеристик стенда непересечение осей не может превышать 1 мм. Тогда при скорости  $\dot{\lambda}_1 = 75$  град/с и ускорении  $\ddot{\lambda}_1 = 15$  град/с<sup>2</sup> дополнительная погрешность составит 0,09 мg.

## Результаты экспериментальных исследований



Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, которые проводились для триады ММА компании Analog Devices – ADXL325 (рис. 3) на стенде двухосном автоматизированном СДА-15-05 производства ООО «ИНЕРТЕХ». Характеристики акселерометров ADXL325: смещение нуля 1,5 В; чувствительность 174 мB/g.

Рис. 3. Испытуемый ИИМ

Характеристики стенда представлены в табл. 1 [9].

	Таблица 1
Параметр	Значение
1. Диапазон углов разворота по обеим осям,°	Не ограничен
2. Погрешность позиционирования по обеим осям,"	15
3. Диапазон скоростей вращения по обеим осям, %/с	±360
4. Отклонение от перпендикулярности осей вращения,'	Не более 1
5. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,01
5. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,01

Дополнительное измерение с учетом малости  $\Delta \theta^c$  принимает следующий вид:  $z_{\Delta \psi - \Delta \lambda_2} = \Delta \psi - \Delta \lambda_2 = \pm \Delta \epsilon.$ 

В рамках исследований были проведены 3 эксперимента:

1. Эксперимент № 1 – испытания триады ММА по стандартному статическому методу, предполагающему угловые позиционирования относительно вектора ускорения свободного падения. Были выполнены требования по выставке испытательного стенда относительно плоскости горизонта ( $\psi = 0$ ;  $\theta^{C} = 0$ ) – контроль осуществлялся с помощью квадранта (±30″). Результаты оценки погрешностей сведены в табл. 2, где в столбце «Паспортные данные» приведены данные паспорта на серию трехосного MMA ADXL325 фирмы-производителя Analog Devices.

2. Эксперимент № 2 – после окончания эксперимента № 1 (в том же запуске) была реализована дополнительная процедура исследования погрешностей триады ММА. При этом триада поочередно оказывается в используемых в стандартном методе положениях (-g, 0, +g для каждой измерительной оси триады) при смене знака угловой скорости. На рис. 4 и 5 приведены переходные процессы при оценке смещений нулей и масштабных коэффициентов – установившиеся значения соответствуют результатам эксперимента № 1 (на рисунках показаны горизонтальными линиями.



коэффициентов ММА  $\hat{K}_i$ , [мВ/g]

3. Эксперимент №3 – без выключения аппаратуры после окончания эксперимента № 2 были заданы ненулевые значения углов рассогласования осей стенда и плоскости горизонта ( $\psi = -30'; \theta^c = 40'$ ) – контроль осуществлялся с помощью квадранта (±30").

Т	а	б	Л	И	Ц	а	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Параметры	Паспортные данные	Эксперимент №1	Эксперимент №2	Эксперимент №3	
		Стандартный метод Дополнитель		ная процедура	
		$\Psi = 0;$	$\psi = -30'; \theta^{c} = 40'$		
$\left[\hat{K}_{x};\hat{K}_{y};\hat{K}_{z}\right],\text{ MB/}g$	174	171,5±0,4 175,8±0,4 174,7±0,4	171,5±0,5 175,7±0,5 174,7±0,5	171,5±0,5 175,8±0,5 174,8±0,5	
$\left[\hat{W}_{x}^{(0)};\hat{W}_{y}^{(0)};\hat{W}_{z}^{(0)}\right], \text{MB}$	1500	1504,2±0,3 1500,2±0,3 1495,5±0,3	1504,2±0,4 1504,3±0,4 1504,3±0,4	1504,2±0,4 1504,2±0,4 1504,3±0,4	
$\begin{bmatrix} \alpha_{y}; \beta_{z}; \alpha_{x}; \\ \gamma_{z}; \beta_{x}; \gamma_{y} \end{bmatrix}$	-	[-30'; 30'; 15'; 1°12'; 10'; 2°23'] ±8'	[-31'; 27'; 16'; 1°6'; 12'; 2°18'] ±10'	[-32'; 26'; 16'; 1°4'; 11'; 2°20'] ±10'	
$[\hat{\psi};\hat{\theta}^{c}]$	-	-	[-3'; 2']	[-33'; 43']	
$[\Delta \hat{x}_2, \Delta \hat{y}_2, \Delta \hat{z}_2],$ мм	-	-	[-9; 15; 2]	[-7; 16; 4]	
Длительность испытаний, мин	-	40	1,5		

Достоверность предложенного подхода подтверждается достаточной степенью повторения результата стандартного метода (табл. 2). Сопоставляя оценки неточности выставки стенда относительно плоскости горизонта, видно, что отличие результата эксперимента № 3 (рис. 6) от эксперимента № 2 соответствует заданным углам (см. табл. 2), а отличие оценок  $\hat{\psi}$ ,  $\hat{\theta}^{c}$  от заданных (с точностью ±30″) не привносит в погрешность более 1 мg.



Рис. 6. Оценки  $\Delta \hat{\psi}$  и  $\Delta \hat{\theta}^{c}$ , [...°]



Отличие оценок сдвигов нулей экспериментов № 1 и 2, 3 для измерительных осей *x* и *y* может быть вызвано нестабильностью основания в условиях отсутствия «развязанного» фундамента, что значительно сказывается на оценивании сдвигов нулей при квазигармонических колебаниях. Точность оценки масштабных коэффициентов и углов неортогональностей измерительных осей с использованием предложенной дополнительной процедуры калибровки соответствует точности стандартного метода калибровки в поле силы тяжести Земли, которая, в свою очередь, определяется в наибольшей степени погрешностью испытательного оборудования, характеристики которого приведены в табл. 1.

В отличие от традиционных методов, предложенная процедура позволяет оценить положение акселерометра (рис. 7) относительно приборной системы координат ИИМ. Подобная задача решена в работе [7], однако там определяется положение триады одноосных акселерометров при задании гармонических ко-

лебаний поочередно вокруг каждой из осей чувствительности акселерометров. Принципиальным отличием предлагаемого подхода является задание квазигармонических колебаний одновременно вокруг двух осей стенда с подбором таких угловых скоростей и амплитуд колебаний, при которых минимальные значения угловых скоростей достигаются в угловых положениях, используемых в стандартном методе.

На рис. 8 приведены координаты геометрического центра испытуемого модуля (точка  $\mathcal{L}$ ) относительно центра качания, задаваемого испытательным стендом (H; W; L) = (138; 20; 20 мм). Эти координаты были использованы в ОФК в качестве априорной информации. Геометрические параметры стенда считаются известными исходя из его конструкции.



гриады MMA

Требования к точности знания координат точки Ц определяются требованиями к точности оценки взаимного расположения акселерометров в триаде.

В свою очередь из конструкторской документации производителя ИИМ следует, что микросхема ADXL325 (положение точки *O*) характеризуется отстоянием от Ц на ( $\Delta H$ ;  $\Delta W$ ;  $\Delta L$ ) = (- $\Delta x_2$ ; - $\Delta y_2$ ; - $\Delta z_2$ ) = (7; -15; 4 мм), которое собственно и должно оцениваться ОФК (5) при реализации предложенной процедуры. Расположение акселерометра в ИИМ известно по информации производителя измерительного модуля с точностью 0,5 мм. Из табл. 2 видно, что расхождение не превысило 2 мм. При реализации процедуры на производстве данное свойство может выступать для производителя инерциальных модулей, у которого, безусловно, имеется информация о величинах ( $\Delta H$ ;  $\Delta W$ ;  $\Delta L$ ) в качестве критерия корректности настроек ОФК и соответственно достоверности полученных оценок параметров математической модели показаний триады акселерометров (1).

## Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Анализ существующих методов испытаний акселерометров показал, что для обеспечения потребностей производителей микромеханических инерциальных датчиков и малогабаритных систем на их основе актуальной является разработка дополнительной процедуры исследований погрешностей триад ММА, позволяющей обеспечить точность стандартного метода калибровки за меньшее время и практически не зависящей от неточности выставки средства испытаний.

2. Предложен подход, основанный на комплексировании показаний триады ММА и датчиков углов стенда с использованием ОФК, который при реализации режима квазигармонических угловых колебаний позволил реализовать процедуру оценки параметров математической модели (1) и погрешностей неточности выставки стенда относительно плоскости горизонта. Предложенный подход может быть востребован на предприятиях-производителях микромеханических датчиков на этапе пуско-наладочных работ, так как при значительном сокращении времени испытаний обеспечивает точность калибровки, сравнимую со стандартным методом, уменьшает вклад термочувствительности датчиков, а также позволяет оценить дополнительные по сравнению со стандартным методом параметры.

3. Слабая зависимость предложенного подхода от точности начальной выставки стенда (по отношению к движению основания) позволяет ограничиться кратковременной стабильностью (3' за 1,5 мин, см. табл. 2), что существенно, так как снимает требования по строительству «развязанного» фундамента.

4. Результаты экспериментальных исследований погрешностей триады MMA (ADXL325) выполнялись на двухосном стенде СДА-15-05 и подтвердили слабую зависимость процедуры от неточности выставки стенда с обеспечением точности 10 мg. При этом время калибровки составило 1,5 мин, в то время как стандартный метод калибровки требует 40 мин (табл. 2).

# Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект № 8.1068.2014/К.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Элмор, 2008. 400 с.
- Синельников А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов, 1979. 176 с.
- 3. Климкович Б.В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов // Гироскопия и навигация. 2014. № 3. С. 29–40.

Гироскопия и навигация. Том 24, № 4 (95), 2016

- Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор, 2008. С. 145–154.
- 5. Челпанов И.Б., Евстифеев М.И., Кочетков А.В. Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. 2014. № 4 (166). С. 16–20.
- 6. **Иванов П.А**. Разработка и исследование методов испытаний микромеханических инерциальных модулей: дисс... канд. техн. наук: 05.11.16. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
- Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Драницына Е.В., Степанов А.П. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трёхгранника // Гироскопия и навигация. 2016. № 1 (92). С. 55–63.
- Агапов М.Ю. Разработка и исследование гониометрических систем контроля преобразователей угла: дисс... канд. техн. наук: 05.11.16. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.
- 9. Стенд двухосный автоматизированный СДА [Электронный pecypc]. 2013. Режим доступа: http://inertech.org/production/9-stend-ispytatelnyy-dvuhosnyy-sid-2.html.

Filatov Yu.V., Boronakhin A.M., Dao V.B., Le V.Ch., and Podgornaya L.N. (St. Petersburg Electrotechnical University LETI, Russia)

Studying the Static Errors of MEMS Accelerometer Triad in Quasiharmonic Oscillation Mode // Giroskopiya i Navigatsiya. 2016. Vol. 24. No. 4 (95). P. 35–46.

*Abstract.* A procedure is proposed for studying the errors of MEMS accelerometer triad, which features reduced test duration as compared with traditional methods and allows estimation of mutual geometrical arrangement of sensors in the triad. The proposed approach consists in studying the static characteristics of sensors in oscillating angular motion mode and provides estimation of error coefficients in mathematical model of accelerometer readings along with location of accelerometer triad in the closed IMU casing. Results of studying the errors of MEMS accelerometer triad are presented.

Key words: inertial navigation, readings model, MEMS accelerometer, two-axis test bed

### REFERENCES

- 1. Boronakhin A.M., Luk'yanov D.P., and Filatov Yu.V. Opticheskie i mikromekhanicheskie inertsial'nye pribory (Optical and MEMS Inertial Devices). St. Petersburg: Elmor, 2008.
- Sinelnikov A.E. Nizkochastotnye lineinye akselerometry. Metody i sredstva poverki i graduirovki (Low-Frequency Linear Accelerometers. Calibration and Graduation Methods). Moscow: Izd. standartov, 1979.
- Klimkovich B.V. SINS calibration in inertial mode. Combination of velocity and scalar methods // Gyroscopy and Navigation. 2015. No. 1. P. 25–32.
- Izmailov E.A., Lepe S.N., Molchanov A.V., and Polikovsky E.F. Scalar method for calibrating and balancing strapdown inertial navigation systems // 15th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg: Elektropribor, 2008. P. 151–159.
- Chelpanov I.B., Evstifeev M.I., and Kochetkov A.V. Test methods for MEMS sensors and devices // Pribory. 2014. No. 4 (166). P. 16–20.
- 6. **Ivanov P.A.** Development and studies of MEMS IMU test methods. Cand.Sci. Dissertation. 05.11.16. St. Petersburg: LETI, 2011.
- Emel'yantsev G.I., Blazhnov B.A., Dranitsyna E.V., and Stepanov A.P. Calibration of a precision SINS IMU and construction of IMU-bound orthogonal frame // Gyroscopy and Navigation, 2016. No. 3. P. 205–213.
- 8. Agapov M.Yu. Development and studies of goniometric test systems of angular converters. Cand. Sci. Dissertation. 05.11.16. St. Petersburg: LETI, 2009.
- 9. Two-axis automated test bed SDA. http://inertech.org/production/9-stend-ispytatelnyydvuhosnyy-sid-2.html. 2013.

Материал поступил 13.11.2015