

ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

Цветков Г.А., Егоров М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Представлена автоматизированная измерительная система с использованием приборов и средств инерциальной навигации, позволяющая повысить точность измерения углового рассогласования установочных площадок под приборы научной аппаратуры с учетом динамической погрешности измерения углового рассогласования. Расширение функциональных возможностей достигается за счет дополнительного измерения угла азимутального рассогласования. (E-mail: zvetkov71043@mail.ru)

Ключевые слова: измерительная навигационная головка, акселерометр, датчик момента, угловой датчик, угловые отклонения.

Введение

Автоматизированная измерительная система, представленная в данной статье, предназначена для измерения углов взаимной ориентации установочных площадок под приборы научной аппаратуры летательных аппаратов. Известна система для измерения наклона площадок [1], состоящая из двух идентичных измерительных каналов.

Недостатком устройства является то, что при больших углах азимутального рассогласования между базовыми осями координат контролируемых площадок и при колебаниях основания возникает динамическая погрешность, снижающая точность измерений.

Известны оптико-электронные устройства [2] для измерения пространственных угловых координат, к недостаткам которых следует отнести небольшой диапазон измеряемых углов ± 20 угл. мин, большое рабочее расстояние 3–6 м, что затрудняет контроль площадок, расположенных в труднодоступных местах объекта. В работе [3] приведена конструкция одноосного наклономера с газодинамическим подвесом чувствительного элемента. Двухкоординатный наклономер [4, 5.] предназначен для измерения двух пространственных угловых отклонений контрольных площадок от горизонта. Чувствительным элементом устройств

является одноосный наклономер [3] установленный на вращающемся основании.

Конструкция и принцип действия разработанной автоматизированной измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений приведена в работе [6], там же показана структурно-функциональная схема измерительной системы, процедура функционирования, проведен анализ и представлено теоретическое обоснование определения углов азимутального рассогласования между базовыми осями контролируемых площадок и углов отклонения от горизонта.

На основании проведенного анализа работы измерительной системы в работе [6] выявлены закономерности, позволяющие обоснованно подходить к проектированию измерительных систем контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок и при наклоне изделия относительно горизонта определить дополнительно угол азимутального рассогласования между базовыми осями двух контролируемых площадок.

Цель данной работы – оценка точностных характеристик автоматизированной измерительной системы [6] для контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок и повышение точности измерения с учетом динамической погрешности измерения.

Оценка динамической ошибки измерений углового рассогласования

В реальных условиях при контроле пространственных угловых отклонений изделие может совершать низкочастотные колебания, обусловленные нестабильностью основания, которые приводят к динамической погрешности измерения углового рассогласования.

Пусть вдоль оси OY_Γ действует ускорение:

$$\ddot{y} = a_y \sin(\omega t + v_y), \quad (1)$$

а вдоль оси OX_Γ действует ускорение:

$$\ddot{x} = a_x \sin(\omega t + v_x), \quad (2)$$

где: a_x, a_y – амплитуды действующих ускорений, ω – частота колебаний, v_y, v_x – начальные фазы, t – время.

Оценим динамическую ошибку измерения углов отклонения первой контролируемой площадки от горизонта. Проекция измеряемого ускорения на связанные оси контролируемых площадок можно записать в виде:

$$W_{\eta_1}^0 = g \sin(\varphi_{10}^0)^* + a_y \sin(\omega t + v_{y1}) \cos(A_1 + \Delta A) \times \cos(\varphi_{10}^0)^* + a_x \sin(\omega t + v_{x1}) \sin(A_1 + \Delta A) \cos(\varphi_{10}^0)^*. \quad (3)$$

$$W_{\xi_1}^0 = -g \sin(\vartheta_{10}^0)^* + a_y \sin(\omega t + v_{y2}) \sin(A_1 + \Delta A) - a_x \sin(\omega t + v_{x1}) \cos(A_1 + \Delta A) \sin(\vartheta_{10}^0)^*. \quad (4)$$

Представим:

$$(\varphi_{10}^0)^* = (\varphi_{10}^0)^* + \Delta\varphi_{1g}^0, (\vartheta_{10}^0)^* = (\vartheta_{10}^0)^* + \Delta\vartheta_{1g}^0. \quad (5)$$

Считая $\Delta\varphi_{1g}^0$ и $\Delta\vartheta_{1g}^0$ малыми, подставив (5) в (3) и (4) с учётом $\sin(\varphi_1^0)^* = \frac{W_{\eta_1}^0}{g}$, $\sin(\vartheta_1^0)^* = \frac{W_{\xi_1}^0}{g}$, получим:

$$\Delta\varphi_{1g}^0 = \frac{a_y}{g} \sin(\omega t + v_{y1}) \cos(A_1 + \Delta A) + \frac{a_x}{g} \sin(\omega t + v_{x1}) \sin(A_1 + \Delta A). \quad (6)$$

Динамическая ошибка измерения угла $(v_1^0)^*$ может быть определена:

$$\Delta v_{1g}^0 = \frac{a_y}{g} \sin(\omega t + v_{y2}) \cos(A_1 + \Delta A) + \frac{a_x}{g} \sin(\omega t + v_{x1}) \sin(A_1 + \Delta A). \quad (7)$$

Аналогично оценим динамическую ошибку измерения для второй контролируемой площадки:

$$\Delta\varphi_{2g}^0 = \frac{a_y}{g} \sin(\omega t + v_{y1}) \cos A_2 + \frac{a_x}{g} \sin(\omega t + v_{x1}) \sin A_2, \quad (8)$$

$$\Delta v_{2g}^0 = \frac{a_y}{g} \sin(\omega t + v_{y2}) \sin A_2 + \frac{a_x}{g} \sin(\omega t + v_{x1}) \cos A_2. \quad (9)$$

Динамическую погрешность определения угла азимутального рассогласования определим, записав проекции ускорений на оси $O\xi_1$ и $O\eta_1$ с учетом (1), (2):

$$W_{\eta_1}^k = -g[-\cos\varphi_3 \sin(\varphi_1^0)^* + \sin\varphi_3 \sin(A_1 + \Delta A) \cos(\varphi_1^0)^*] + a_y \sin(\omega t + v_{y3}) \sin(A_1 + \Delta A) \cos(\varphi_1^0)^* + a_x \sin(\omega t + v_{x4}) \times [\cos\varphi_3 \sin(A_1 + \Delta A) \cos(\varphi_1^0)^* + \sin\varphi_3 \sin(\varphi_1^0)^*] \quad (10)$$

Для малых углов $(\varphi_1^0)^*, \varphi_2^0, (\varphi_1^k)^*, \varphi_2^k, (v_1^k)^*, (v_1^0)^*, v_2^0$ и φ_3 и с учётом малости динамической погрешности δA_{ξ} , запишем выражения для динамической ошибки определения азимутального угла первой площадки:

$$\delta A_{g1} = \frac{a_y \cos(A_1 + \Delta A)}{g \sin\varphi_3} [\sin(\omega t + v_{y1}) + \sin(\omega t + v_{y3})] + \frac{a_x \sin(A_1 + \Delta A)}{g \sin\varphi_3} [\sin(\omega t + v_{x1}) + \sin(\omega t + v_{x4})] \quad (11)$$

Динамическая погрешность определения азимутального угла для второй контролируемой площадки может быть записана в виде выражения:

$$\delta A_{g2} = \frac{a_y \cos A_2}{g \sin\varphi_3} [\sin(\omega t + v_{y1}) + \sin(\omega t + v_{y3})] + \frac{a_x \sin A_2}{g \sin\varphi_3} [\sin(\omega t + v_{x1}) + \sin(\omega t + v_{x4})]. \quad (12)$$

Определим погрешность измерения разности горизонтальных углов с учетом уравнений (6)–(9):

$$\delta|\Delta\varphi| = \frac{a_y}{g} [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] \sin(\omega t + v_{y1}) + \frac{a_x}{g} [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)] \sin(\omega t + v_{x1}), \quad (13)$$

$$\delta|\Delta\vartheta| = \frac{a_y}{g} [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)] \sin(\omega t + v_{y2}) + \frac{a_x}{g} [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] \sin(\omega t + v_{x1}). \quad (14)$$

Максимальные значения величин (13), (14):

$$\delta|\Delta v|_{g \max} = \frac{a_y}{g} [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] + \frac{a_x}{g} [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)], \quad (15)$$

$$\delta|\Delta\vartheta|_{g \max} = \frac{a_y}{g} [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)] + \frac{a_x}{g} [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] \quad (16)$$

Максимальное значение динамической ошибки разности азимутальных углов с учетом (11) и (12) запишется в виде:

$$\delta|\Delta A|_{g \max} = \frac{2a_y}{g \sin \varphi_3} [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] + \frac{2a_x}{g \sin \varphi_3} [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)] \quad (17)$$

Оценим величину динамических погрешностей измерения углов рассогласования при использовании системы измерения наклона [I]. При жестком закреплении преобразователей на основании угол ΔA в выражениях (15)–(17) равен нулю. Тогда, при

$$\frac{a_x}{g} = \frac{a_y}{g} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ рад}, A_1=0, A_2=45^\circ, \varphi_3=5^\circ.$$

$$\delta(\Delta\varphi)_{g \max} = 10 \text{ угл. с}, \delta(\Delta A)_{g \max} = 3,9 \text{ угл. мин.}$$

При развороте платформы ИГ-I с измерительным преобразователем на угол ΔA в азимутальной плоскости, значение угла A_2 можно

представить в виде:

$$A_2 = A_1 + \Delta A + \delta\bar{A}, \quad (18)$$

где: ΔA – угол, равный номинальному значению угла азимутального рассогласования между осями $0X_1$ и $0Y_2$ контролируемых площадок изделия; $\delta\bar{A}$ – разностный угол, определяемый допусками на изготовление площадок.

Тогда с учетом малости $\delta\bar{A}$, получим:

$$\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A) = \delta\bar{A} \sin(A_1 + \Delta A), \quad (19)$$

$$\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A) = \delta\bar{A} \cos(A_1 + \Delta A). \quad (20)$$

С учетом (19) и (20) выражения (15)–(17) примут вид:

$$\delta|\Delta\varphi|_{g \max} = \delta(\vartheta)_{g \max} = \frac{\delta\bar{A} \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{g}, \quad (21)$$

$$\delta|\Delta A|_{g \max} = \frac{2\delta\bar{A} \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{g \sin \varphi_3}. \quad (22)$$

Оценим динамическую ошибку с учетом $\delta\bar{A} = 45 \cdot 10^{-4}$ рад:

$$\delta|\Delta\varphi|_{g \max} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ угл. с}, \delta|\Delta A|_{g \max} = 5 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ угл. с.}$$

Следовательно, предлагаемое техническое решение позволяет снизить динамическую погрешность определения углов отклонения от горизонта в 200 раз и при наклоне изделия на малые углы позволяет определить угол азимутального рассогласования следующим образом.

С учетом малости φ_3 , выражений (11)–(14), динамической ошибки определения угловых отклонений площадок, находим угол азимутального рассогласования:

$$\text{tg}(A + \Delta A) = \frac{\sin \frac{(\varphi_1^k)^* - (\varphi_1^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_1^k)^* - (\vartheta_1^0)^*}{2}},$$

$$\text{tg}(A_2) = \frac{\sin \frac{(\varphi_2^k)^* - (\varphi_2^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_2^k)^* - (\vartheta_2^0)^*}{2}}.$$

Находим:

$$\delta\bar{A} = \arctg \frac{\sin \frac{\varphi_2^k - \varphi_2^0}{2}}{\sin \frac{\vartheta_2^k - \vartheta_2^0}{2}} - \frac{\sin \frac{(\varphi_1^k)^* - (\varphi_1^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_2^k)^* - (\vartheta_2^0)^*}{2}}. \quad (23)$$

Затем определяем угол азимутального рас­согласования по формуле:

$$\delta A^* = \Delta A + \delta\bar{A}. \quad (24)$$

Углы позволяют определить ориентации базовой системы координат второй площадки $X_2OY_2Z_2$ в системе координат первой площадки $X_1OY_1Z_1$.

Следовательно, предлагаемое техническое решение позволяет снизить динамическую погрешность измерения пространственных углов отклонения и при наклоне изделия на малый угол определить угол азимутального рас­согласования.

Технические характеристики

Диапазон измерений, (град)

- Горизонтальных координат 0–10
 - Азимутальных координат 0–360

Чувствительность 0,1
 измерительного преобразователя (угл. с)

Погрешность измерения (угл. с)

- Горизонтальных координат 0,5
 - Азимутальных координат 15

Заключение

Представленная автоматизированная измерительная система позволяет снизить динамическую погрешность измерения пространственных угловых отклонений и определить угловое несогласование установочных площадок в азимутальном направлении.

Предложенный метод контроля параметров углового несогласования установочных площадок может быть применен в машиностроении, станкостроении, геологии и геофизики, при построении нефтегазовых скважин.

Список использованных источников.

1. Система для измерения наклона. Патент 4378693 США Заявл. 11.02.81 г. № 233645. Оpubл. 05.04.83. МКИ G 01 B 5/28.
2. Высокоточные угловые измерения / под. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1987.
3. Наклономер А. с. СССР №297159 от 01.09.90 г. / Г.А. Цветков, М.Г. Каган.
4. Двухкоординатный наклономер А.с. 298908 СССР 1998 г. / Г.А. Цветков, М.Г. Каган, Е.П. Полищук, С.Е. Степанов.
5. Цветков, Г.А. Система контроля пространственных угловых отклонений / Г.А. Цветков, Г.Ф. Утробин // Аэрокосмическая техника. Вестник ПГТУ. – № 18. – Пермь, 2004. – С. 130–134.
6. Цветков, Г.А. Автоматизированная измерительная система контроля пространственных угловых отклонений / Г.А. Цветков // Приборы и методы измерений. – № 2 (5). – Минск : БНТУ, 2012. – С. 57–62.

Zvetkov G.A., Egorov M.A.

Estimation of accuracy characteristics of the automated measurement system for control of spatial angular deviations

The principles and methods of computer-aided measuring system using instruments of inertial navigation are presented. This allows more accurate measurement of angular deviation of installation sites for scientific equipment taking into account dynamics deviation of angle error. Enhanced functionality is achieved by additional measurement of azimuthal angle error. (E-mail: zvetkov71043@mail.ru)

Key words: measuring head with the NCS, the accelerometer, orientation, the angular deviation from the horizon and azimuth.

Поступила в редакцию 23.10.2012.