

На правах рукописи

УДК 629.7.05



Дзуев Астемир Адамович

**ИНВАРИАНТНАЯ КАЛИБРОВКА БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СИСТЕМ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее распространенных способов калибровки блока акселерометров бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) является способ, основанный на свойстве инвариантности, позволяющий существенно снизить требования к испытательному оборудованию и к точности установки блока акселерометров на испытательном стенде.

Калибровка блока акселерометров с использованием инвариантного подхода сопряжена с рядом ограничений, связанных: с невозможностью определения полного набора инструментальных погрешностей акселерометров; с методическими ошибками, обусловленными неравноточностью измерительных каналов блока акселерометров; с методическими ошибками, зависящими от величины искомым систематических составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров.

Совокупность всех измерительных положений, реализуемых в ходе калибровки блока акселерометров составляют программу калибровки. Длительность регистрации измерений акселерометров в заданных измерительных положениях программы калибровки, а также их количество будут определять время, затрачиваемое на осуществление процедуры калибровки. В связи с этим, возрастает роль программ калибровки акселерометров, позволяющих сократить трудозатраты на осуществление процедуры калибровки без существенного снижения точности.

Способам калибровки акселерометров на основе инвариантного подхода, а также программам калибровки посвящен целый ряд работ, среди которых можно отметить публикации авторов из МГТУ им. Н.Э. Баумана (Егоров Ю.Г., Попов Е.А., Мьинт Хтун Наинг и др.), ПАО «МИЭА» (Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В. и др.), МГУ им. М.В. Ломоносова (Болотин Ю.В., Деревянкин А.В., Матасов А.И. и др.), Национального технического университета Украины (Аврутов В.В., Головач С.В., Мелешко В.В. и др.).

Таким образом, актуальным представляется проведение исследований, направленных: на расширение возможностей способов калибровки акселерометров, основанных на свойстве инвариантности; на снижение длительности калибровки без существенного снижения точности определения инструментальных погрешностей акселерометров.

Цель работы. Повышение точности и достоверности оценок инструментальных погрешностей блока акселерометров БИНС, а также снижение трудозатрат на осуществление калибровки посредством разработки и применения оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки. Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. Синтезирована нелинейная математическая модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС с использованием точного двухстепенного испытательного стенда;
2. Синтезирована и исследованы точностные характеристики оптимальной инвариантной программы калибровки блока акселерометров БИНС;
3. Синтезирована итерационная процедура калибровки блока акселерометров БИНС;

4. Экспериментально подтверждена эффективность разработанной оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием методов теории инерциальных навигационных систем, теории линейных векторных пространств, теории оценивания динамических систем.

Научная новизна. В диссертации получены новые научные результаты:

1. Синтезирована нелинейная математическая модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС с использованием точного двухстепенного испытательного стенда. Полученная модель позволяет расширить возможности инвариантной калибровки блока акселерометров и обеспечивает возможность точного и достоверного определения всех неизвестных параметров модели, характеризующих инструментальные погрешности акселерометров и погрешности выставки испытательного стенда;

2. Синтезирована оптимальная инвариантная программа калибровки блока акселерометров, позволяющая сократить трудозатраты на осуществление калибровки без существенного снижения точности определения инструментальных погрешностей. Синтезирована программа калибровки блока акселерометров БИНС с учетом квадратичных составляющих погрешностей масштабных коэффициентов и исследованы ее точностные характеристики;

3. Синтезирована итерационная процедура калибровки блока акселерометров БИНС, позволяющая повысить точность и достоверность оценок инструментальных погрешностей акселерометров за счет учета неравноточности измерительных каналов блока акселерометров БИНС;

4. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанной оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС.

Практическая значимость. Разработанная оптимальная инвариантная программа и итерационная процедура калибровки позволяют с достаточной точностью осуществлять калибровку блока акселерометров БИНС. Использование предложенной оптимальной инвариантной программы калибровки позволяет снизить трудозатраты на этапе производства БИНС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нелинейная математическая модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС с использованием измерений точного двухстепенного испытательного стенда, включающая в свой состав параметры, характеризующие инструментальные погрешности акселерометров и погрешности выставки испытательного стенда;

2. Синтезированная оптимальная инвариантная программа калибровки блока акселерометров БИНС из 18 измерительных положений, обеспечивающая значительное снижение трудоемкости процесса калибровки и результаты исследований ее точностных характеристик. Методика синтеза и результаты исследований точностных характеристик инвариантных программ калибровки блока акселерометров БИНС с учетом квадратичных составляющих погрешностей масштабных коэффициентов;

3. Синтезированная итерационная процедура калибровки блока акселерометров БИНС, учитывающая неравноточность измерительных каналов блока акселерометров БИНС и обеспечивающая точное и достоверное определение оценок инструментальных погрешностей акселерометров;

4. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность разработанной оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС.

Достоверность полученных результатов. Результаты анализа точности оптимальной программы калибровки, а также численного моделирования итерационной процедуры калибровки согласуются с результатами экспериментальных исследований, проведенных в АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса» с использованием высокоточного испытательного оборудования.

Внедрение результатов. Полученные в диссертации результаты применяются в АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса» при разработке и выпуске высокоточных инерциальных измерительных блоков и БИНС авиационного назначения.

Личный вклад автора состоит в разработке и экспериментальном подтверждении эффективности: оптимальной программы калибровки, позволяющей существенно снизить трудозатраты на осуществление калибровки блока акселерометров БИНС; итерационной процедуры калибровки, обеспечивающей точное и достоверное определение оценок инструментальных погрешностей блока акселерометров БИНС.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2016); XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2017); Третья Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2017).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 8 публикациях, в том числе в 3 статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 3,54 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 81 наименования, а также приложения. Материал изложен на 156 страницах машинописного текста и включает 41 рисунок, 48 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе осуществлен анализ требований к калибровке блока акселерометров БИНС; приведена функциональная схема калибровки блока акселерометров БИНС; синтезирована нелинейная математическая модель процесса ка-

либровки блока акселерометров БИНС с использованием точного двухступенного испытательного стенда; проведен анализ наблюдаемости параметров синтезированной модели.

Функциональная схема калибровки блока акселерометров БИНС с использованием двухступенного испытательного стенда представлена на Рис. 1.

Блок акселерометров БИНС устанавливаются на испытательном стенде. После чего оператор назначает в БКПИ (блок конфигурации программ испытаний) необходимые программы испытаний, которые загружаются в БУС (блок управляющих сигналов), где формируются команды управления испытательным стендом. Измерительная информация для определения оценок инструментальных погрешностей акселерометров, сформированная в процессе проведения испытаний, накапливается в БРИ (блок регистрации измерений), а затем передается в БОИ (блок обработки информации), где реализуется процедура калибровки акселерометров.

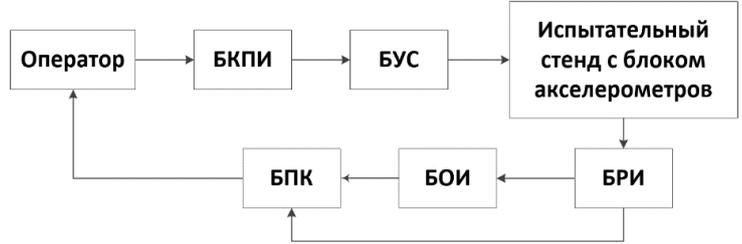


Рис. 1. Функциональная схема калибровки блока акселерометров БИНС

Измерительная информация для осуществления контроля точности из БРИ, а также оценки инструментальных погрешностей акселерометров с выхода БОИ, подаются на вход БПК (блок проверки и контроля), где осуществляется контроль точности.

Синтезированная нелинейная математическая модель измерений блока акселерометров, включает в свой состав инструментальные погрешности акселерометров и малые погрешности выставки испытательного стенда в плоскости местного горизонта:

$$\partial \mathbf{J}^* = \partial \mathbf{J}_{\perp}^* + \partial \mathbf{J}_{\text{H}}^* + \mathbf{W}^* = \Gamma_{\perp} \mathbf{Y}_{\perp} + \Gamma_{\text{H}} \mathbf{Y}_{\text{H}} + \mathbf{W}^*, \quad (1)$$

где

$$\partial \mathbf{J}^* = \begin{pmatrix} \partial J_x^* \\ \partial J_y^* \\ \partial J_z^* \end{pmatrix}, \quad \Gamma_{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \eta_x & 0 & 0 & \eta_y & \eta_z & 0 & 0 & 0 & 0 & -\zeta_x & \xi_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \eta_y & 0 & 0 & 0 & \eta_x & \eta_z & 0 & 0 & -\zeta_y & \xi_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \eta_z & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_x & \eta_y & -\zeta_z & \xi_z \end{pmatrix}, \quad \Gamma_{\text{H}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Y}_{\perp} = (\Delta_x^* \quad \Delta_y^* \quad \Delta_z^* \quad K_x \quad K_y \quad K_z \quad \Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_3 \quad \Phi_4 \quad \Phi_5 \quad \Phi_6 \quad \Delta \varepsilon_1 \quad \Delta \varepsilon_3)^T, \quad \mathbf{Y}_{\text{H}} = (E_x \quad E_y \quad E_z)^T;$$

$$\mathbf{W}^* = (w_x^* \quad w_y^* \quad w_z^*)^T, \quad \xi_x = \cos(\beta), \eta_x = \sin(\alpha)\sin(\beta), \zeta_x = -\cos(\alpha)\sin(\beta), \xi_y = 0, \eta_y = \cos(\alpha), \zeta_y = \sin(\alpha);$$

$$\xi_z = \sin(\beta), \eta_z = -\cos(\beta)\sin(\alpha), \zeta_z = \cos(\alpha)\cos(\beta);$$

$$K_x = \sqrt{1 - \Delta \varphi_1^2 - \Delta \varphi_2^2} (1 + \delta k_x) - 1, \quad \Phi_1 = \Delta \varphi_1 (1 + \delta k_x), \quad \Phi_4 = \Delta \varphi_4 (1 + \delta k_y);$$

$$K_y = \sqrt{1 - \Delta \varphi_3^2 - \Delta \varphi_4^2} (1 + \delta k_y) - 1, \quad \Phi_2 = \Delta \varphi_2 (1 + \delta k_x), \quad \Phi_5 = \Delta \varphi_5 (1 + \delta k_z);$$

$$K_z = \sqrt{1 - \Delta \varphi_5^2 - \Delta \varphi_6^2} (1 + \delta k_z) - 1, \quad \Phi_3 = \Delta \varphi_3 (1 + \delta k_y), \quad \Phi_6 = \Delta \varphi_6 (1 + \delta k_z);$$

$$E_x = K_x (\Delta \varepsilon_3 \xi_x - \Delta \varepsilon_1 \zeta_x) + \Phi_1 (\Delta \varepsilon_3 \xi_y - \Delta \varepsilon_1 \zeta_y) + \Phi_2 (\Delta \varepsilon_3 \xi_z - \Delta \varepsilon_1 \zeta_z);$$

$$E_y = K_y (\Delta \varepsilon_3 \xi_y - \Delta \varepsilon_1 \zeta_y) + \Phi_3 (\Delta \varepsilon_3 \xi_x - \Delta \varepsilon_1 \zeta_x) + \Phi_4 (\Delta \varepsilon_3 \xi_z - \Delta \varepsilon_1 \zeta_z);$$

$$E_z = K_z (\Delta \varepsilon_3 \xi_z - \Delta \varepsilon_1 \zeta_z) + \Phi_5 (\Delta \varepsilon_3 \xi_x - \Delta \varepsilon_1 \zeta_x) + \Phi_6 (\Delta \varepsilon_3 \xi_y - \Delta \varepsilon_1 \zeta_y);$$

Здесь $\partial \mathbf{J}^*$ – нормированный вектор невязки измерений блока акселерометров в собственных осях; $\partial \mathbf{J}_{\perp}^*$ – линейная составляющая модели; $\partial \mathbf{J}_{\text{H}}^*$ – нелинейная

составляющая модели; \mathbf{W}^* – нормированный вектор измерительных шумов; $\mathbf{Y}_Л$ – вектор состояния для линейной составляющей модели; $\mathbf{Y}_Н$ – вектор нелинейных составляющих модели; $\mathbf{\Gamma}_Л$ – матрица наблюдений для вектора $\mathbf{Y}_Л$; $\mathbf{\Gamma}_Н$ – матрица наблюдений для вектора $\mathbf{Y}_Н$; Δ_i^* ($i = x, y, z$) – смещения нулей акселерометров; δx_i ($i = x, y, z$) – погрешности масштабных коэффициентов акселерометров; $\Delta\varphi_j$ ($j = \overline{1, 6}$) – углы неортогональности осей чувствительности акселерометров; $\Delta\varepsilon_{1,3}$ – погрешности выставки испытательного стенда в плоскости местного горизонта; E_i ($i = x, y, z$) – составляющие вектора $\mathbf{Y}_Н$, выраженные относительно параметров K_i ($i = x, y, z$), Φ_j ($j = \overline{1, 6}$), $\Delta\varepsilon_{1,3}$; α – угол поворота испытательного стенда вокруг внешней оси; β – угол поворота испытательного стенда вокруг внутренней оси.

Синтез нелинейной математической модели процесса инвариантной калибровки блока акселерометров осуществлялся на основе выражения (1):

$$\partial\mathbf{L} = \partial\mathbf{L}_Л + \partial\mathbf{L}_Н + \mathbf{W}_Б^* = \mathbf{H}_Л\mathbf{X}_Л + \mathbf{H}_Н\mathbf{X}_Н + \mathbf{H}_\eta\mathbf{W}^*, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_Л &= (\eta_x \ \eta_y \ \eta_z \ \eta_x^2 \ \eta_y^2 \ \eta_z^2 \ \eta_x\eta_y \ \eta_x\eta_z \ \eta_y\eta_z \ -\zeta_x\eta_x - \zeta_y\eta_y - \zeta_z\eta_z \ \xi_x\eta_x + \xi_y\eta_y + \xi_z\eta_z), \\ \mathbf{X}_Л &= (\Delta_x^* \ \Delta_y^* \ \Delta_z^* \ K_x \ K_y \ K_z \ \Phi_1 + \Phi_3 \ \Phi_2 + \Phi_5 \ \Phi_4 + \Phi_6 \ \Delta\varepsilon_1 \ \Delta\varepsilon_3)^T; \\ \mathbf{H}_\eta &= (\eta_x \ \eta_y \ \eta_z), \quad \mathbf{X}_Н = (E_x \ E_y \ E_z)^T, \quad \mathbf{W}^* = (w_x^* \ w_y^* \ w_z^*)^T. \end{aligned}$$

Здесь $\partial\mathbf{L}$ – нормированный вектор невязки измерений блока акселерометров, соответствующий вертикальной оси географической системы координат; $\partial\mathbf{L}_Л$ – линейная составляющая модели; $\partial\mathbf{L}_Н$ – нелинейная составляющая модели; $\mathbf{W}_Б^*$ – нормированный вектор измерительных шумов; $\mathbf{X}_Л$ – вектор состояния для линейной составляющей модели; $\mathbf{X}_Н$ – вектор нелинейных составляющих модели; $\mathbf{H}_Л$ – матрица наблюдений для вектора $\mathbf{X}_Л$; \mathbf{H}_η – вектор, составленный из элементов матрицы направляющих косинусов.

Векторно-матричные уравнения (1), (2) представляют собой нелинейную математическую модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС с использованием точного двухстепенного испытательного стенда, включающая в свой состав 14 неизвестных параметров, из которых: 12 параметров характеризуют инструментальные погрешности акселерометров; 2 параметра характеризуют малые погрешности выставки испытательного стенда в плоскости местного горизонта.

Анализ наблюдаемости калибруемых параметров осуществлялся на основе синтезированной нелинейной математической модели процесса калибровки блока акселерометров БИНС (1), (2). Для этой цели были введены в рассмотрение 3 группы фиксированных поворотов блока акселерометров (Рис. 2).

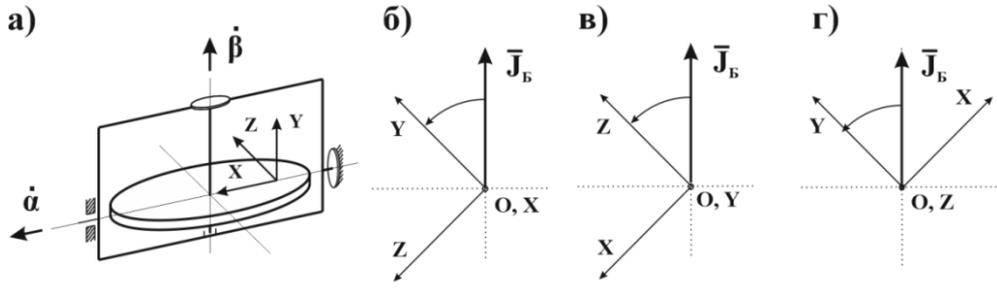


Рис. 2. Схема осуществления фиксированных поворотов: а) схема установки блока акселерометров на испытательном стенде б) 1 группа поворотов; в) 2 группа поворотов; г) 3 группа поворотов

Здесь $\mathbf{J}_b = (0 \ g \ 0)^T$ – вектор кажущегося ускорения, измеряемый акселерометрами в ходе проведения калибровки; g – модуль вектора ускорения силы тяжести.

Модель измерений (1), соответствующая заданным фиксированным поворотам (Рис. 2) имеет следующий вид:

$$\partial \mathbf{J}_k^* = \partial \mathbf{J}_{L_k}^* + \mathbf{W}_k^* = \mathbf{\Gamma}_{L_k} \mathbf{Y}_{L_k} + \mathbf{W}_k^*, \quad (k = \overline{1, 3}), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{\Gamma}_{L_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & -\sin(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & -\cos(\alpha) & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Y}_{L_1} = \begin{pmatrix} \Delta_X^* \\ \Delta_Y^* \\ \Delta_Z^* \\ K_Y \\ K_Z \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_{L_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & -\sin(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Y}_{L_2} = \begin{pmatrix} \Delta_X^* \\ \Delta_Y^* \\ \Delta_Z^* \\ K_X \\ K_Z \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_{L_3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Y}_{L_3} = \begin{pmatrix} \Delta_X^* \\ \Delta_Y^* \\ \Delta_Z^* \\ K_X \\ K_Y \\ \Phi_1 \\ \Phi_3 \\ \Phi_6 \\ \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{pmatrix}.$$

Здесь k – порядковый номер группы поворотов.

Модель процесса инвариантной калибровки (2), соответствующая заданным фиксированным поворотам (Рис. 2) имеет следующий вид:

$$\partial \mathbf{L}_k = \partial \mathbf{L}_{L_k} + \mathbf{W}_{b_k}^* = \mathbf{H}_{L_k} \mathbf{X}_{L_k} + \mathbf{H}_{\eta_k} \mathbf{W}_k^*, \quad (k = \overline{1, 3}), \quad (4)$$

где

$$\mathbf{H}_{L_1} = (\cos(\alpha) \ -\sin(\alpha) \ \cos^2(\alpha) \ \sin^2(\alpha) \ -\sin(\alpha)\cos(\alpha)), \quad \mathbf{X}_{L_1} = (\Delta_Y^* \ \Delta_Z^* \ K_Y \ K_Z \ \Phi_4 + \Phi_6)^T;$$

$$\mathbf{H}_{L_2} = (-\sin(\beta) \ \cos(\beta) \ \sin^2(\beta) \ \cos^2(\beta) \ -\cos(\beta)\sin(\beta)), \quad \mathbf{X}_{L_2} = (\Delta_X^* \ \Delta_Z^* \ K_X \ K_Z \ \Phi_2 + \Phi_5)^T;$$

$$\mathbf{H}_{L_3} = (\sin(\alpha) \ \cos(\alpha) \ \sin^2(\alpha) \ \cos^2(\alpha) \ \cos(\alpha)\sin(\alpha)), \quad \mathbf{X}_{L_3} = (\Delta_X^* \ \Delta_Y^* \ K_X \ K_Y \ \Phi_1 + \Phi_3)^T.$$

Параметры Δ_i^* , K_i ($i = x, y, z$) определяются из модели процесса инвариантной калибровки (4). При этом параметры Φ_j ($j = \overline{1, 6}$) в составе векторов \mathbf{X}_{L_k} ($k = \overline{1, 3}$) представлены в виде линейных комбинаций и не наблюдаемы по отдельности. Для определения указанных параметров используется модель измерений акселерометров (3), в составе которой параметры Φ_j ($j = \overline{1, 6}$) представлены в явном виде.

Модель измерений акселерометров (3) не обладает свойством инвариантности. Следовательно, с учетом известных оценок параметров Δ_i^* , K_i ($i = x, y, z$), сформированных по (4), из модели измерений (3) с достаточной точностью определяются параметры Φ_j ($j = \overline{1, 6}$), $\Delta\varepsilon_{1,3}$.

Таким образом, установлено, что синтезированная нелинейная математическая модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС позволяет определить все неизвестные параметры.

Во второй главе синтезирована оптимальная инвариантная программа калибровки блока акселерометров БИНС; проведен анализ точностных характеристик синтезированной оптимальной программы калибровки; проведен анализ точностных характеристик инвариантных программ калибровки для случая учета квадратичных составляющих масштабных коэффициентов в составе модели инструментальных погрешностей акселерометров.

В процессе синтеза инвариантных программ калибровки блока акселерометров БИНС использовались следующие критерии оптимальности: максимальное подавление влияния измерительного шума на точность калибровки блока акселерометров; снижение трудозатрат на осуществление калибровки блока акселерометров; обеспечение равномерного изменения проекции вектора кажущегося ускорения на ось чувствительности каждого из испытуемых акселерометров. С учетом сформированных критериев была синтезирована оптимальная инвариантная программа калибровки из 18 измерительных положений (Рис. 3).

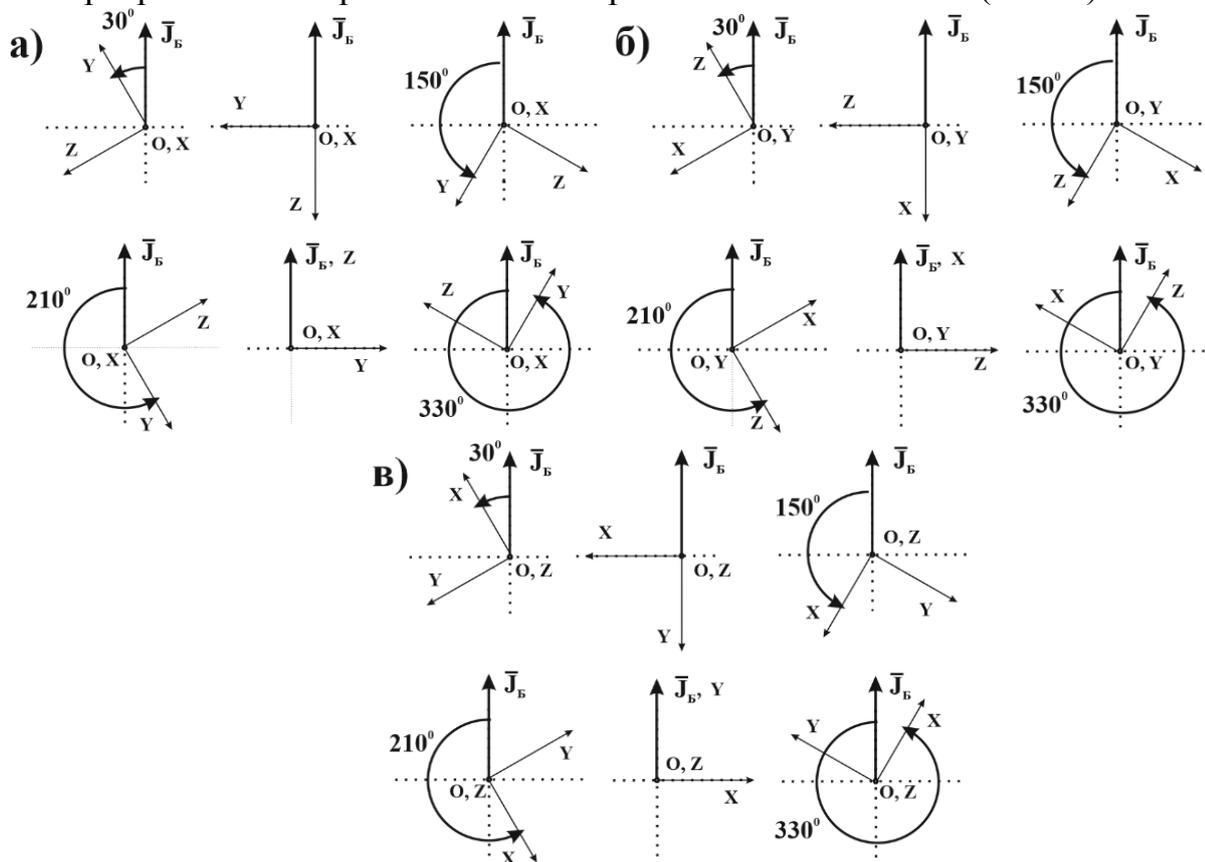


Рис. 3. Схема ориентации осей чувствительности акселерометров: а) 1 группа поворотов; б) 2 группа поворотов; в) 3 группа поворотов

Анализ точности синтезированной оптимальной программы калибровки осуществлялся с использованием линеаризованной модели процесса инвариантной калибровки блока акселерометров (2):

$$\begin{aligned} \partial J_L^* &= \Delta_x^* \eta_x + \Delta_y^* \eta_y + \Delta_z^* \eta_z + \delta k_x \eta_x^2 + \delta k_y \eta_y^2 + \\ &+ \delta k_z \eta_z^2 + \Delta \varphi_{13} \eta_x \eta_y + \Delta \varphi_{25} \eta_x \eta_z + \Delta \varphi_{46} \eta_y \eta_z; \\ \Delta \varphi_{13} &= \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_3, \quad \Delta \varphi_{25} = \Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_5, \quad \Delta \varphi_{46} = \Delta \varphi_4 + \Delta \varphi_6. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь ∂J_L^* – нормированная невязка измерений блока акселерометров, соответствующая вертикальной оси географической системы координат; $\Delta \varphi_{13}, \Delta \varphi_{25}, \Delta \varphi_{46}$ – параметры, представленные в виде линейных комбинаций углов $\Delta \varphi_j$ ($j = \overline{1, 6}$).

В соответствии с (5), матрица ковариации, характеризующая ошибки определения оценок инструментальных погрешностей акселерометров будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{K} = \sigma^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}.$$

Здесь σ – среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной оставляющей измерений акселерометров (считается одинаковым для всех измерительных каналов блока акселерометров); \mathbf{H} – матрица наблюдений.

Матрица ковариации \mathbf{K} в нормированном виде будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{K}^* = (1/\sigma^2) \mathbf{K}. \quad (6)$$

Элементы матрицы (6), расположенные по главной диагонали характеризуют нормированные дисперсии ошибки определения оценок инструментальных погрешностей акселерометров.

Анализ точности оптимальной программы калибровки из 18 измерительных положений по матрице ковариации (6) осуществлялся в сравнении с программой калибровки, характеризующейся избыточностью, то есть, включающей большее количество измерительных положений. Для этой цели была синтезирована инвариантная программа калибровки из 24 измерительных положений.

Нормированные СКО ошибки определения оценок инструментальных погрешностей акселерометров, сформированные в соответствии с (6) для программ калибровки из 18 и 24 измерительных положений соответственно представлены в Таблице 1 (здесь $\sigma_{\Delta_{X,Y,Z}}$ – СКО ошибки определения смещений нулей; $\sigma_{\delta k_{X,Y,Z}}$ – СКО ошибки определения погрешностей масштабных коэффициентов; $\sigma_{\Delta \varphi_{13,25,46}}$ – СКО ошибки определения углов неортогональности осей чувствительности).

Таблица 1.

Сравнительный анализ точности программ калибровки

Количество измерительных положений	Нормированные среднее квадратические отклонения		
	$\sigma_{\Delta_{X,Y,Z}} / \sigma$	$\sigma_{\delta k_{X,Y,Z}} / \sigma$	$\sigma_{\Delta \varphi_{13,25,46}} / \sigma$
18	0.408	0.483	1.155
24	0.353	0.418	1.000

По данным из Таблицы 1 видно, что при уменьшении количества измерительных положений в 1.3 раза (с 24 до 18) нормированные СКО ошибки определения оценок инструментальных погрешностей акселерометров увеличиваются не более чем на 16%.

При учете параметров δk_i ($i = x, y, z$), характеризующих квадратичные составляющие погрешностей масштабных коэффициентов выражение (5) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \partial J_L^* = & \Delta_x^* \eta_x + \Delta_y^* \eta_y + \Delta_z^* \eta_z + \delta k_x \eta_x^2 + \delta k_y \eta_y^2 + \delta k_z \eta_z^2 + \\ & + \delta k_{x_2} \eta_x^3 + \delta k_{y_2} \eta_y^3 + \delta k_{z_2} \eta_z^3 + \Delta \varphi_{13} \eta_y \eta_x + \Delta \varphi_{25} \eta_z \eta_x + \Delta \varphi_{46} \eta_z \eta_y. \end{aligned}$$

Анализ точности по матрице ковариации (6) в этом случае осуществлялся на основе программы калибровки из 24 измерительных положений (Таблица 2).

Таблица 2.

Анализ точности программы калибровки из 24 измерительных положений при учете параметров δk_i ($i = x, y, z$)

Нормированные среднеквадратические отклонения			
$\sigma_{\Delta_{x,y,z}} / \sigma$	$\sigma_{\delta k_{x,y,z}} / \sigma$	$\sigma_{\delta k_{x_2,y_2,z_2}} / \sigma$	$\sigma_{\Delta \varphi_{13,25,46}} / \sigma$
1.118	0.418	1.414	1.000

По данным из Таблиц 1, 2 видно, что точность определения смещений нулей акселерометров снизилась более чем в 3 раза. Это обусловлено наличием корреляции между смещениями нулей и квадратичными составляющими погрешностей масштабных коэффициентов акселерометров.

Таким образом, установлено, что: использование оптимальной инвариантной программы калибровки из 18 измерительных положений позволяет сократить трудозатраты на осуществление процедуры калибровки на 33% без существенного снижения точности; расширение вектора состояния модели процесса инвариантной калибровки с учетом квадратичных составляющих погрешностей масштабных коэффициентов акселерометров приводит к снижению точности определения смещений нулей более чем в 3 раза.

В третьей главе синтезирована итерационная процедура калибровки блока акселерометров БИНС; в составе синтезированной итерационной процедуры калибровки осуществлен учет неравноточности измерительных каналов блока акселерометров БИНС.

Синтез итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС осуществлялся на основе модели процесса инвариантной калибровки (2) и модели измерений акселерометров (1). Структурная схема итерационной процедуры калибровки блока акселерометров представлена на Рис. 4.

На 1 этапе работы процедуры калибровки осуществляется накопление измерений датчиков угла положения испытательного стенда $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, и нормированных измерений блока акселерометров \mathbf{J}^* , которые используются для расчета информационных невязок $\partial \mathbf{J}^*$, $\partial \mathbf{L}$.

На 2 этапе работы процедуры калибровки определяются неизвестные параметры модели процесса калибровки (1), (2). Процедура определения составляющих векторов $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Л}}$, $\bar{\mathbf{X}}_{\text{Л}}$ осуществляется итерационно. На 1 итерации оценки параметров $\hat{\Delta}_i^*$, \hat{K}_i ($i = x, y, z$) определяются из линейной составляющей модели процесса инвариантной калибровки (2) посредством алгоритма обобщенного метода наименьших квадратов:

$$\bar{\mathbf{X}}_{\text{Л}} = (\mathbf{H}_{\text{Л}}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_{\text{Л}})^{-1} \mathbf{H}_{\text{Л}}^T \mathbf{R}^{-1} \partial \mathbf{L}. \quad (7)$$

Здесь \mathbf{R} – матрица ковариации (на первой итерации в качестве матрицы ковариации используется единичная матрица).



Рис. 4. Итерационная процедура калибровки блока акселерометров

Оценки параметров Φ_j ($j = \overline{1, 6}$), $\Delta \epsilon_{1,3}$ определяются из линейной составляющей модели измерений акселерометров (1) с учетом известных оценок параметров $\hat{\Delta}_i^*, \hat{K}_i$ ($i = x, y, z$), сформированных в соответствии с (7):

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Л}} = (\mathbf{\Gamma}_{\text{Л}}^T \mathbf{\Gamma}_{\text{Л}})^{-1} \mathbf{\Gamma}_{\text{Л}}^T \partial \mathbf{J}^*, \quad \partial \mathbf{J}^* = \begin{pmatrix} \partial J_X^* - \hat{\Delta}_X^* - \sin(\alpha) \sin(\beta) \hat{K}_X \\ \partial J_Y^* - \hat{\Delta}_Y^* - \cos(\alpha) \hat{K}_Y \\ \partial J_Z^* - \hat{\Delta}_Z^* + \sin(\alpha) \cos(\beta) \hat{K}_Z \end{pmatrix} \quad (8)$$

Оценки векторов $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Л}}$, $\bar{\mathbf{X}}_{\text{Л}}$, сформированные на 1 итерации, носят приближенный характер и подлежат уточнению на последующих итерациях. Для этого с учетом приближенных оценок $\bar{\mathbf{X}}_{\text{Л}}$, $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Л}}$ определяются нелинейные составляющие $\partial \mathbf{L}_{\text{Н}}$, $\partial \mathbf{J}_{\text{Н}}^*$ необходимые для уточнения информационных невязок $\partial \mathbf{J}^*, \partial \mathbf{L}$ в (1), (2):

$$\partial \mathbf{L} - \partial \bar{\mathbf{L}}_{\text{Н}} = \mathbf{H}_{\text{Л}} \mathbf{X}_{\text{Л}} + \mathbf{H}_{\text{Н}} \mathbf{W}^*, \quad \partial \mathbf{J}^* - \partial \bar{\mathbf{J}}_{\text{Н}}^* = \mathbf{\Gamma}_{\text{Л}} \mathbf{Y}_{\text{Л}} + \mathbf{W}^*. \quad (9)$$

Скорректированные значения информационных невязок в левой части (9) используются для инициализации следующей итерации, в ходе которой формируются уточненные оценки векторов $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Л}}$, $\bar{\mathbf{X}}_{\text{Л}}$.

На 3 этапе работы процедуры калибровки с учетом точных оценок $\hat{K}_i (i = x, y, z)$, $\hat{\Phi}_j (j = \overline{1, 6})$, сформированных на 2 этапе определяются погрешности масштабных коэффициентов $\delta k_i (i = x, y, z)$ и углы неортогональности осей чувствительности акселерометров $\Delta \varphi_j (j = \overline{1, 6})$. Оценки указанных параметров определяются посредством реализации дополнительной итерационной процедуры из нелинейных соотношений для $K_i, (i = x, y, z)$, $\Phi_j (j = \overline{1, 6})$ в (1) с учетом их известных оценок, сформированных на 2 этапе работы процедуры калибровки акселерометров.

Таким образом, синтезированная итерационная процедура калибровки, позволяет определить полный набор инструментальных погрешностей блока акселерометров $\hat{\Delta}_i^*$, $\delta k_i (i = x, y, z)$, $\Delta \hat{\varphi}_j (j = \overline{1, 6})$, а также погрешности выставки испытательного стенда $\Delta \hat{\varepsilon}_{1,3}$.

Математическая модель измерений, лежащая в основе инвариантного подхода (2), является композицией выходных данных 3 измерительных каналов блока акселерометров. В частности, модель (2) содержит слагаемое $\mathbf{H}_\eta \mathbf{W}^*$, которое представляет собой композицию шумов измерительных каналов блока акселерометров:

$$\mathbf{H}_\eta \mathbf{W}^* = w_x^* \eta_x + w_y^* \eta_y + w_z^* \eta_z. \quad (10)$$

Дисперсия измерительного шума (10) будет иметь следующий вид (считается, что выходные данные измерительных каналов блока акселерометров не коррелированы):

$$D_{w^*} = D_x \eta_x^2 + D_y \eta_y^2 + D_z \eta_z^2. \quad (11)$$

Здесь $D_i (i = x, y, z)$ – дисперсии шумов измерительных каналов блока акселерометров.

Следовательно, наличие в составе калибруемого блока акселерометров, к примеру, одного измерительного канала, характеризующегося более высокими шумовыми характеристиками, приведет к тому, что оценки инструментальных погрешностей акселерометров, соответствующих менее шумным измерительным каналам, будут определены с методической ошибкой.

С целью повышения точности и достоверности оценок инструментальных погрешностей блока акселерометров, характеризующегося неравноточностью его измерительных каналов, была синтезирована процедура калибровки, базирующаяся на алгоритме обобщенного метода наименьших квадратов (Рис. 5).

В блоке 1 с учетом известных оценок $\hat{\Delta}_i^*$, $\hat{K}_i (i = x, y, z)$, $\hat{\Phi}_j (j = \overline{1, 6})$, $\Delta \hat{\varepsilon}_{1,3}$ (формируются на 1 итерации в соответствии со схемой на Рис. 4) корректируются невязки измерений акселерометров. Для этой цели используются уравнения из (3), характеризующие измерения акселерометров, вокруг оси чувствительности которых осуществляется вращение:

$$\partial \mathbf{J}_k^{*c} = \partial \mathbf{J}_k^* - \partial \bar{\mathbf{J}}_{L_k}^* - \partial \bar{\mathbf{J}}_{H_k}^*, (k = \overline{1, 3}). \quad (12)$$

В блоке 2 с учетом (12) определяются несмещенные оценки дисперсии шумов измерительных каналов блока акселерометров:

$$D_i = \left(\frac{1}{N-3} \right) \sum_{l=1}^N \partial J_k^{*c}(l), \quad (i = x, y, z), \quad (l = \overline{1, N}), \quad (k = \overline{1, 3}) \quad (13)$$

Здесь N – количество измерительных положений в каждой из $k = \overline{1, 3}$ групп поворотов.

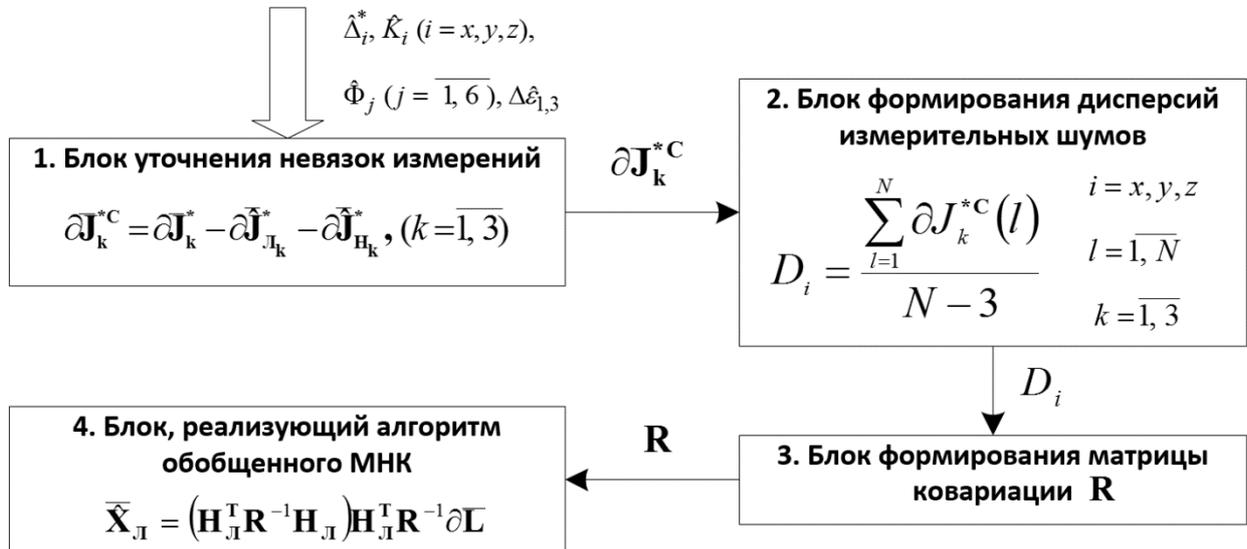


Рис. 5. Структурная схема процедуры калибровки с учетом неравноточности измерительных каналов блока акселерометров

В блоке 3 с учетом известных оценок (13) в соответствии с (11) определяется матрица ковариации \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \text{diag} \{ D_{w_{11}}^*, D_{w_{12}}^*, \dots, D_{w_{1N}}^*, D_{w_{21}}^*, D_{w_{22}}^*, \dots, D_{w_{2N}}^*, D_{w_{31}}^*, D_{w_{32}}^*, \dots, D_{w_{3N}}^* \}. \quad (14)$$

В блоке 4 с учетом матрицы ковариации (14) реализуется алгоритм обобщенного метода наименьших квадратов (7).

Таким образом, синтезирована процедура калибровки, учитывающая неравноточность измерительных каналов блока акселерометров и обеспечивающая повышение точности и достоверности оценок инструментальных погрешностей акселерометров.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность разработанной оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС.

Экспериментальные исследования проводились с использованием высокоточного двухступенного испытательного стенда производства фирмы «Acutronic» (Швейцария). В качестве испытуемых акселерометров был выбран акселерометр А-100 производства фирмы АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса».

Анализ шумовых составляющих измерительных каналов блока акселерометров осуществлялся с использованием вариации Аллана. По результатам проведенного экспериментального исследования установлено, что оптимальное время усреднения выходных данных измерительных каналов блока акселерометров в измерительных положениях заданной программы калибровки составляет 163 секунды. При этом погрешность определения величины метрологического эталона

$g_{\text{э}}$ (эталонное значение модуля вектора ускорения силы тяжести \mathbf{g} на месте проведения испытаний составляет 9.815179 м/с^2) не превышает: 1.6 угл. сек. для канала X (2σ), 1.3 угл. сек. для канала Y (2σ), 2.7 угл. сек. для канала Z (2σ).

Экспериментальное исследование точностных характеристик итерационной процедуры калибровки акселерометров проводилось с использованием программы калибровки из 24 измерительных положений. Полученные оценки инструментальных погрешностей акселерометров, использовались для уточнения исходных измерений блока акселерометров. В качестве критерия точности калибровки акселерометров использовалась разность измеренного $g_{\text{И}}$ и эталонного $g_{\text{э}}$ значений модуля вектора ускорения силы тяжести \mathbf{g} (Рис. 6):

$$\Delta J^C = g_{\text{И}} - g_{\text{э}} = \sqrt{(J_X^C)^2 + (J_Y^C)^2 + (J_Z^C)^2} - g_{\text{э}}. \quad (15)$$

Здесь $J_i^C (i = x, y, z)$ – уточненные измерения акселерометров.

По данным из Рис. 6 видно, что после компенсации оценок инструментальных погрешностей максимальное (по модулю) значение невязки измерений блока акселерометров ΔJ^C не превышает 9 угл. сек.

Таким образом, установлено, что итерационная процедура калибровки позволяет с высокой точностью и достоверностью определять инструментальные погрешности акселерометров.

Экспериментальное исследование точностных характеристик оптимальной программы калибровки блока акселерометров проводилось в сравнении с программой калибровки из 24 измерительных положений. Информационная невязка ΔJ^C , сформированная по уточненным измерениям акселерометров в соответствии с (15) представлена на Рис. 7.

По данным из Рис. 7, а) видно, что после компенсации оценок инструментальных погрешностей, полученных с использованием программы калибровки из 24 измерительных положений, максимальное значение ΔJ^C составляет 17 угл. сек.

По данным из Рис. 7, б) видно, что после компенсации оценок инструментальных погрешностей, полученных с использованием оптимальной программы калибровки из 18 измерительных положений, максимальное значение ΔJ^C не превышает 7 угл. сек.

Таким образом, установлено, что оптимальная программа калибровки из 18 измерительных положений не уступает по точности программе калибровки из 24

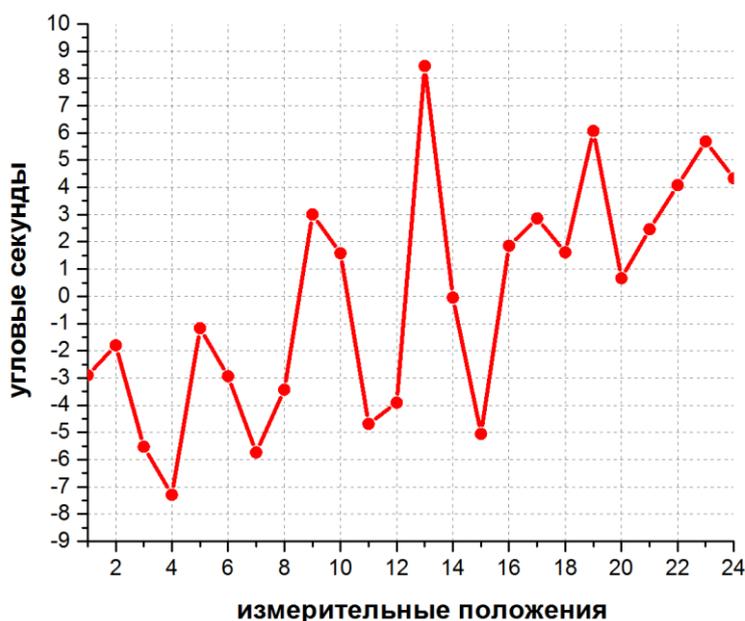


Рис. 6. Точность итерационной процедуры калибровки блока акселерометров

измерительных положений, но при этом позволяет снизить трудозатраты на осуществление процедуры калибровки.

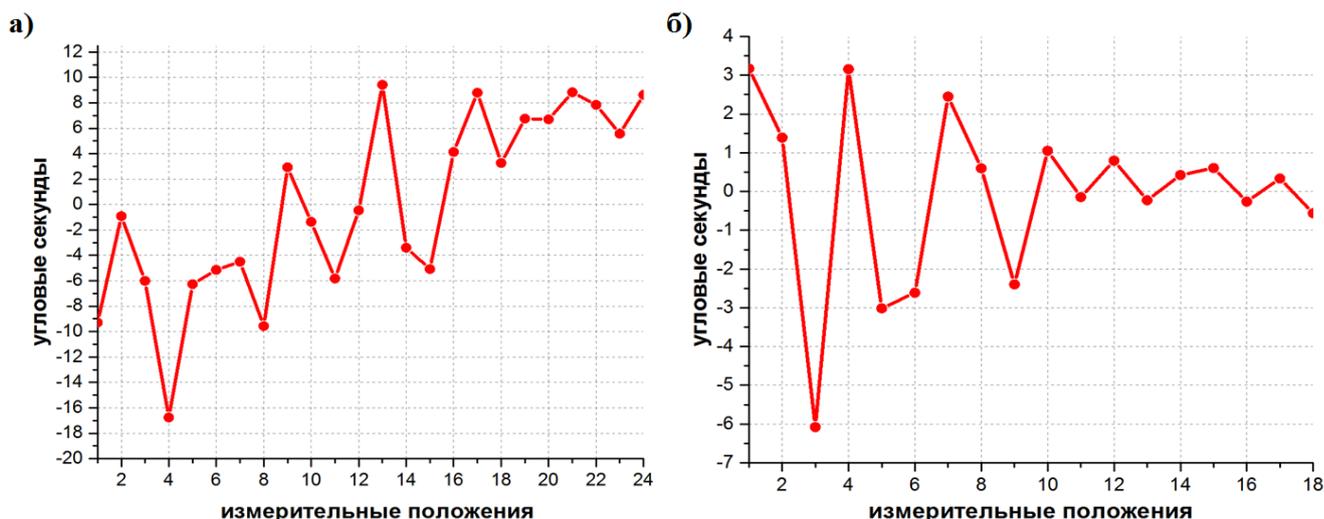


Рис. 7. Точность калибровки блока акселерометров при использовании программы калибровки из: а) 24 измерительных положений; б) 18 измерительных положений

Экспериментальное исследование температурной зависимости инструментальных погрешностей блока акселерометров проводилось с использованием оптимальной программы калибровки из 18 измерительных положений. Для построения температурной модели инструментальных погрешностей акселерометров было сформировано 13 наборов измерений в диапазоне температур окружающей среды от -55°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3.

Температура окружающей среды

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T, °C	-55	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60

Температурная модель строилась посредством аппроксимации (полином 3 порядка) оценок инструментальных погрешностей акселерометров, полученных по 13 наборам измерений с использованием итерационной процедуры калибровки.

Экспериментальное исследование точностных характеристик температурной модели блока акселерометров А-100 проводилось с использованием двух наборов измерений, сформированных при температуре окружающей среды -40°C и $+50^{\circ}\text{C}$ соответственно (Рис. 8). Указанные наборы измерений были сформированы в условиях, когда температура окружающей среды изменялась на $+10^{\circ}\text{C}$ (относительно начальной температуры) со скоростью $+2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

По данным из Рис. 8 видно, что измерения блока акселерометров характеризуются ярко выраженным трендом, который обусловлен изменением температуры окружающей среды.

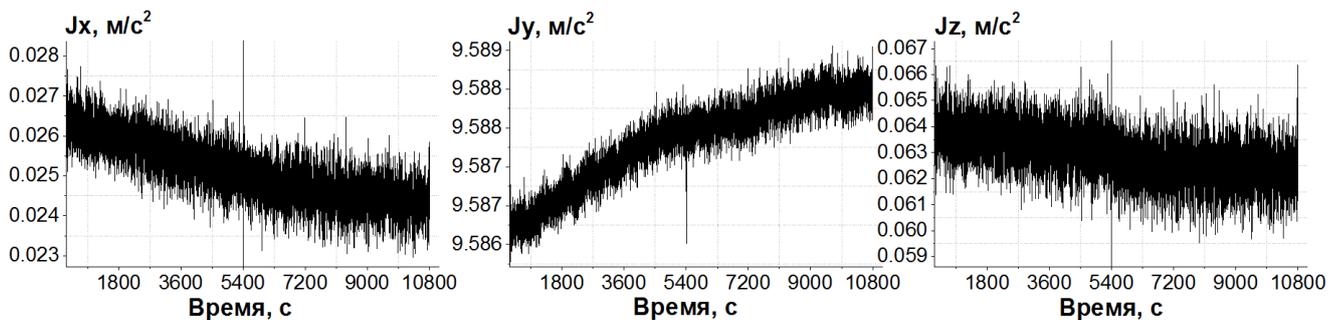


Рис. 8. Измерения акселерометров (на примере 1 набора измерений)

Учет температурной модели инструментальных погрешностей позволил существенно снизить температурную зависимость акселерометров (Рис.9).

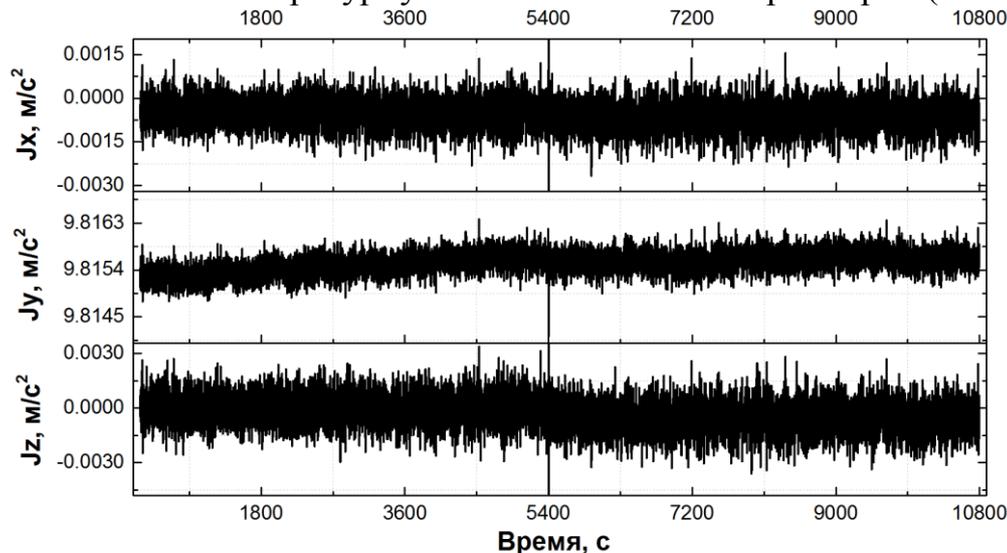


Рис. 9. Уточненные измерения акселерометров

Информационная невязка блока акселерометров ΔJ^C , сформированная по уточненным и сглаженным измерениям (фильтр скользящее среднее с интервалом усреднения 60 сек.) в соответствии (15) приведена на Рис. 10.

По данным из Рис. 10 видно, что максимальное значение ΔJ^C не превышает 12 угл. сек.

Таким образом, установлено, что сформированная температурная модель позволяет с высокой точностью компенсировать инструментальные погрешности акселерометров, обусловленные изменением температуры окружающей среды.

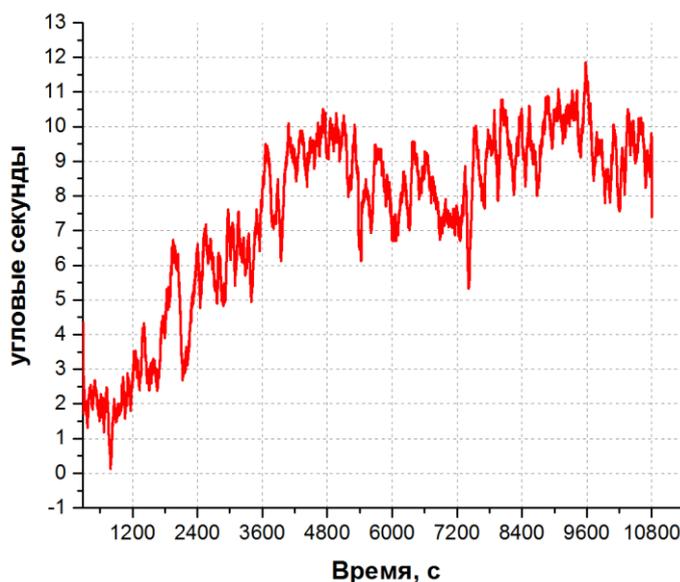


Рис. 10. Точность калибровки блока акселерометров

В общих выводах и заключении приведены основные результаты исследований, проведенных в рамках диссертации.

Основные результаты и выводы по работе

1. Синтезирована нелинейная математическая модель процесса калибровки блока акселерометров БИНС с использованием точного двухстепенного испытательного стенда. Разработанная модель сочетает в себе достоинства как инвариантного подхода, позволяющего с высокой точностью и достоверностью определить оценки смещений нулей и погрешностей масштабных коэффициентов, так и модели измерений акселерометров, обеспечивающей точное и достоверное определение оценок углов неортогональности осей чувствительности и погрешностей выставки испытательного стенда.

2. Синтезирована оптимальная инвариантная программа калибровки, включающая в свой состав 18 измерительных положений и позволяющая сократить трудозатраты на осуществление процедуры калибровки на 33% без существенного снижения точности определения инструментальных погрешностей акселерометров. По результатам проведенных исследований установлено, что расширение вектора состояния модели процесса инвариантной калибровки с учетом квадратичных составляющих погрешностей масштабных коэффициентов акселерометров приводит к снижению точности определения смещений нулей более чем в 3 раза.

3. Посредством комбинирования модели процесса инвариантной калибровки и модели измерений акселерометров синтезирована итерационная процедура калибровки блока акселерометров БИНС. В составе синтезированной итерационной процедуры калибровки осуществлен учет неравноточности измерительных каналов блока акселерометров, что обеспечивает повышение точности и достоверности оценок инструментальных погрешностей акселерометров.

4. Проведены экспериментальные исследования точностных характеристик оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров БИНС. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой эффективности оптимальной инвариантной программы и итерационной процедуры калибровки блока акселерометров.

Основные публикации по теме диссертации

1. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Уравнения процесса инвариантной калибровки акселерометров БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2016. № 8. С. 3 – 12 (1,25 п.л. / 0,75 п.л.).

2. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Анализ наблюдаемости инструментальных погрешностей акселерометров БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2016. № 12. С. 11 – 18 (1,00 п.л. / 0,83 п.л.).

3. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Синтез оптимальных программ калибровки акселерометров БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2017. № 5. С. 3 – 17 (1,88 п.л. / 1,33 п.л.).

4. Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А., Голиков В.П. Методы калибровки бесплатформенной навигационной системы (БИНС) различного класса точности // *Материалы XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. 2016. С. 46 – 51 (0,75 п.л. / 0,36 п.л.).