

УДК.621.398.694

DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.2.162-178

Л. В. ВОДИЧЕВА, Ю. В. ПАРЫШЕВА

ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА С ПОМОЩЬЮ ОТНОСИТЕЛЬНО ГРУБОГО ПОВОРОТНОГО СТОЛА

Предлагается методика калибровки датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока на относительно грубом (1-2°) поворотном столе, интегрирующая прямые и косвенные методы. Погрешности калибровки оцениваются аналитически и с помощью математического моделирования. Для прямых методов обосновывается выбор программных ориентаций и сравниваются векторный и скалярный способы. Приводятся результаты применения методики к калибровке измерительного блока на волоконно-оптических гироскопах.

Ключевые слова: бесплатформенный инерциальный измерительный блок, датчики угловой скорости, акселерометры, скалярная калибровка, косвенная калибровка.

Введение

Обеспечение максимальной точности калибровки датчиков бесплатформенных инерциальных измерительных блоков (БИИБ) на имеющемся оборудовании является нетривиальной научно-технической проблемой, привлекающей внимание исследователей и разработчиков. Калибровка БИИБ с помощью относительно грубых (1-2°) поворотных столов обсуждается во множестве работ, начался процесс систематизации и сравнительного анализа различных способов калибровки [1]. В боль-

Водичева Лариса Валентиновна. Главный научный сотрудник, АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова» (Екатеринбург).

Парышева Юлия Владимировна. Кандидат физико-математических наук, начальник группы, АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова».

Статья по докладу на 11-й Российской мультikonференции по проблемам управления, 2018.

шинстве работ в качестве алгоритма оценивания точностных параметров БИИБ рассматривается фильтр Калмана, а погрешности калибровки рассчитываются путем решения дисперсионных уравнений погрешностей оценки, являющихся составной частью процедуры калмановской фильтрации, либо с помощью математического моделирования. Это не позволяет в физическом смысле ясно интерпретировать ни алгоритмы калибровки, ни влияние различных источников погрешностей на точность оценки тех или иных конкретных параметров.

Калибровка блока акселерометров и смещений нуля датчиков угловой скорости (ДУС), реализуемая с помощью прямых методов, в значительной мере аналогична калибровке акселерометров и уходов гироблоков платформенных ИНС. Калибровка платформенных инерциальных навигационных систем (ИНС), в том числе на подвижном основании, для изделий ракетно-космической техники (РКТ) успешно внедрена и совершенствуется в АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова» с середины 1970-х годов [2]. Новой задачей, которая решается с помощью косвенного метода, является оценка погрешностей масштабных коэффициентов и углов ориентации осей чувствительности ДУС относительно осей приборной системы координат (ПСК). Рассматриваемую в данной работе методику стендовой калибровки, интегрирующую прямые и косвенные методы, предполагается использовать при входном контроле и периодической проверке точностных параметров БИИБ перспективных изделий РКТ.

В процессе калибровки оцениваются средние в запуске значения отклонений точностных параметров БИИБ от их систематических значений, учитываемых в алгоритмах обработки информации, что характеризует нестабильность параметров от запуска к запуску («невоспроизводимость» параметров). Рассматриваются следующие источники погрешностей калибровки: систематические и случайные погрешности поворотного стола в сумме с погрешностями установки корпуса БИИБ относительно плиты поворотного стола и погрешностями ориентации осей чувствительности датчиков относительно корпуса БИИБ, а также методические погрешности алгоритмов. Нестабильность параметров в запуске, которая также приводит к погрешностям калибровки, оценивается экспериментально разработчиком БИИБ.

Основными задачами, которые ставились при создании методики и рассматриваются в данной статье, являются:

- обеспечение максимальной наблюдаемости всех оцениваемых параметров при минимальном количестве программных ориентаций и разворотов;
- декомпозиция уравнений измерения и их физически ясная интерпретация при обеспечении относительных погрешностей калибровки не более 1-2%, что дает две верные значащие цифры;
- вывод аналитических соотношений для оценки погрешностей калибровки.

Модель оцениваемых точностных параметров БИИБ

В модель погрешностей датчиков БИИБ включены: смещения нуля, погрешности масштабных коэффициентов и погрешности взаимной ориентации осей чувствительности акселерометров и ДУС. Параметризацию модели проведем следующим образом. Для погрешностей масштабных коэффициентов и смещений нуля:

$$\text{для акселерометров} - \hat{\dot{w}}_p = (1 + k_p^A) \dot{w}_p + \Delta \dot{w}_p, \quad p = x', y', z',$$

$$\text{для датчиков угловой скорости} - \hat{\omega}_q = (1 + k_q^G) \omega_q + \Delta \omega_q, \quad q = x'', y'', z'',$$

где OX', OY', OZ' , OX'', OY'', OZ'' – оси чувствительности соответственно акселерометров и ДУС; $\hat{w}_p, \hat{\omega}_q$ – измеренные значения проекций кажущегося ускорения и угловой скорости; $\dot{w}_p, \omega_q$ – фактические значения проекций измеряемых векторов; k_p^A, k_q^G – погрешности масштабных коэффициентов акселерометров и ДУС; $\Delta\dot{w}_p, \Delta\omega_q$ – смещения нуля акселерометров и ДУС.

Для неизбыточного БИИБ с ортогонально ориентированными осями погрешности ориентации осей чувствительности датчиков в ПСК $OXYZ$ будем задавать через малые углы отклонения осей датчиков от соответствующих осей ПСК (углы неортогональности): α_{pq} – для акселерометров, γ_{pq} – для ДУС, $p, q = x, y, z; p \neq q$, где p – ось датчика, q – ось ПСК. В этом случае нелинеаризованная матрица направляющих косинусов осей датчиков в ПСК будет иметь вид:

$$A(G) = \begin{bmatrix} \cos \alpha(\gamma)_{xy} \cos \alpha(\gamma)_{xz} & \sin \alpha(\gamma)_{xy} & \cos \alpha(\gamma)_{xy} \sin \alpha(\gamma)_{xz} \\ \cos \alpha(\gamma)_{yz} \sin \alpha(\gamma)_{yx} & \cos \alpha(\gamma)_{yz} \cos \alpha(\gamma)_{yx} & \sin \alpha(\gamma)_{yz} \\ \sin \alpha(\gamma)_{zx} & \cos \alpha(\gamma)_{zx} \sin \alpha(\gamma)_{zy} & \cos \alpha(\gamma)_{zx} \cos \alpha(\gamma)_{zy} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Угол неортогональности положителен, если угол между осью датчика и соответствующей ортогональной осью ПСК меньше $\pi/2$. Оси ПСК будем привязывать к осям чувствительности двух базовых акселерометров OX', OY' : единичный вектор $\vec{e}_X$ направим вдоль единичного вектора $\vec{e}_{X'}$ оси первого акселерометра; единичный вектор $\vec{e}_Z = \frac{\vec{e}_{X'} \times \vec{e}_{Y'}}{|\vec{e}_{X'} \times \vec{e}_{Y'}|}$ будет ортогонален плоскости, образованной осями чувствительности базовых акселерометров; единичный вектор $\vec{e}_Y$ дополнит систему координат до правой. При этом $\alpha_{xy} = \alpha_{xz} = \alpha_{yz} = 0$, а оцениваемыми параметрами для акселерометров будут углы $\alpha_{yx}, \alpha_{zx}, \alpha_{zy}$, которые связаны с углами между осями чувствительности акселерометров ϑ следующим образом:

$$\begin{aligned} \vartheta_{x'y'} &= \frac{\pi}{2} - \alpha_{yx}; \quad \vartheta_{z'x'} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{zx}; \\ \cos \vartheta_{z'x'} &= \sin \alpha_{yx} \sin \alpha_{zx} - \cos \alpha_{yx} \cos \alpha_{zx} \sin \alpha_{zy} \quad (\vartheta_{y'z'} \approx \frac{\pi}{2} - \alpha_{zy}). \end{aligned} \quad (2)$$

Оцениваемые шесть углов привязки осей ДУС к осям ПСК γ_{pq} являются функциями трех углов взаимной неортогональности осей чувствительности ДУС и трех углов привязки трехгранника, связанного с осями ДУС, к трехграннику, связанному с осями акселерометров.

Программа калибровки

Калибровка на поворотном столе, исходя из физического смысла, состоит из:

- 1) оценки точностных параметров блока акселерометров с использованием в качестве эталона нормальной реакции опоры на ускорение силы тяжести (далее – ускорение силы тяжести);

- 2) оценки смещений нуля ДУС при измерении тем или иным способом скорости вращения Земли;
- 3) оценки масштабных коэффициентов и углов привязки осей ДУС к осям ПСК при разворотах БИИБ вокруг их осей чувствительности.

Методы калибровки можно разделить на два класса: прямые и косвенные. В прямых методах на вход алгоритмов оценивания поступают непосредственно результаты измерений датчиков (векторная калибровка) либо модули измеряемых векторов (скалярная калибровка). В косвенных методах инструментальные погрешности БИИБ оцениваются по рассчитываемым проекциям линейного (кажущегося) ускорения либо скорости в географической системе координат (ГСК). Под ГСК понимается правая ортогональная система координат $ONHE$, у которой ось ON направлена на север, ось OH – вдоль местной вертикали вверх, ось OE – на восток.

Калибровка акселерометров эффективно реализуется прямыми методами. Смещения нуля ДУС можно оценить с помощью как прямых, так и косвенных методов. Косвенные методы калибровки смещений нуля ДУС основаны на оценке ухода аналитической платформы вокруг северной оси в режиме гирокомпасирования БИНС [3], что требует достаточно больших временных затрат. Оценить масштабные коэффициенты и углы привязки осей ДУС к осям ПСК, непосредственно измеряя скорость вращения Земли, с требуемой точностью невозможно: для этого требуются развороты БИИБ вокруг различных осей. Оригинальный прямой метод скалярной калибровки этих параметров предложен в работе [4]. В рассматриваемой методике, как и в большинстве работ, для оценки погрешностей ДУС, зависящих от измеряемой угловой скорости, используется косвенный метод калибровки. Полная программа калибровки реализует как прямые, так и косвенные методы.

Смещения нуля ДУС, не оцениваемые при косвенной калибровке, являются одним из источников ее погрешностей. Имеет смысл оценивать их предварительно и учитывать при обработке информации в процессе косвенной калибровки. В свою очередь, на точность калибровки смещений нуля ДУС влияют погрешности горизонтирования, в силу чего желательно предварительно откалибровать акселерометры. Таким образом, программу калибровки целесообразно осуществлять последовательно в четыре этапа:

- 1) оценка масштабных коэффициентов и смещений нуля акселерометров;
- 2) оценка углов взаимной ориентации осей чувствительности акселерометров;
- 3) оценка смещений нуля ДУС;
- 4) оценка масштабных коэффициентов и углов привязки осей чувствительности ДУС к осям ПСК.

На каждом последующем этапе нужно учитывать результаты оценок предыдущего этапа.

Калибровка акселерометров

Выбор программных ориентаций для калибровки блока акселерометров (плана калибровки) осуществляется на практике как исходя из физического смысла, так и с помощью формализованных процедур оптимизации. Первый подход представлен в работе [5], в которой программа калибровки содержит 18 ориентаций, при этом в число оцениваемых параметров включены погрешности поворотного устройства. В этом же исследовании приведен подробный обзор методов калибровки блока акселерометров.

В лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова решение

задачи оптимизации плана калибровки получено с помощью гарантирующего подхода [6]; оптимальная программа калибровки содержит 15 ориентаций. Вопросы выбора оптимальных программных ориентаций, удовлетворяющих набору критериев, системно рассматриваются также в работе [7], где оптимальный план калибровки содержит 18 ориентаций. В работе [8] программа калибровки также содержит 18 ориентаций, которые выбираются из соображений симметрии, а кроме того, предлагается оригинальный метод оценивания, основанный на минимизации квадратичной функции, зависящей от калибруемых параметров.

В рассматриваемой методике программные ориентации выбираются исходя из физического смысла. Программа калибровки содержит 9 ориентаций, которые не только обеспечивают полную наблюдаемость и позволяют провести декомпозицию уравнений измерения, но и являются оптимальными по критерию минимума погрешностей оценки для каждой группы уравнений. К тому же набору ориентаций приводит предложенный в работе [4] метод выбора программы калибровки, основанный на максимизации коэффициентов чувствительности модулей измеряемых векторов относительно калибруемых параметров.

Оценка смещений нуля и масштабных коэффициентов

Для оценки смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента ось чувствительности каждого акселерометра ориентируется в двух направлениях – вертикально вверх и вниз. Это позволяет проводить калибровку каждого акселерометра отдельно. Покажем, что в этом случае отклонения оценок параметров от их истинных значений, рассматриваемые как функции погрешностей горизонтирования, принимают минимальное значение.

Для обеспечения наблюдаемости необходимо проводить измерения в двух ориентациях, различных относительно направления вектора ускорения силы тяжести. Уравнения измерения для каждого акселерометра имеют вид:

$$\hat{w}_{p,1} = (1 + k_p^A)g \cos \phi_{p,1} + \Delta \dot{w}_p; \quad \hat{w}_{p,2} = (1 + k_p^A)g \cos \phi_{p,2} + \Delta \dot{w}_p, \quad (3)$$

где $\hat{w}_{p,1}$, $\hat{w}_{p,2}$ – осредненные тем или иным способом на интервале наблюдения показания акселерометра p в первом и втором положениях; ϕ_1 , ϕ_2 – углы между осью чувствительности акселерометра и местной вертикалью в первом и втором положении. Решение уравнений (3) имеет вид:

$$k_p^A = \frac{\hat{w}_{p,1} - \hat{w}_{p,2}}{g(\cos \phi_{p,1} - \cos \phi_{p,2})} - 1; \quad \Delta \dot{w}_p = \frac{\hat{w}_{p,1} \cos \phi_{p,2} - \hat{w}_{p,2} \cos \phi_{p,1}}{\cos \phi_{p,2} - \cos \phi_{p,1}}. \quad (4)$$

Отклонения оценок параметров от их истинных значений определяются погрешностями знания проекций ускорения силы тяжести на входную ось акселерометра $\dot{w}_{p,1} = g \cos \phi_{p,1}$, $\dot{w}_{p,2} = g \cos \phi_{p,2}$, которые зависят от точности горизонтирования и в первом приближении могут быть представлены следующим образом:

$$\delta(k_p^A) = \frac{\hat{w}_{p,1} - \hat{w}_{p,2}}{g} \cdot \frac{\delta\phi_{p,1} \sin\phi_{p,1} - \delta\phi_{p,2} \sin\phi_{p,2}}{(\cos\phi_{p,1} - \cos\phi_{p,2})^2}, \quad (5)$$

$$\delta(\Delta\dot{w}_p) = (\hat{w}_{p,2} - \hat{w}_{p,1}) \frac{\delta\phi_{p,1} \sin\phi_{p,1} \cos\phi_{p,2} - \delta\phi_{p,2} \sin\phi_{p,2} \cos\phi_{p,1}}{(\cos\phi_{p,2} - \cos\phi_{p,1})^2}. \quad (6)$$

При $\phi_{p,1} = 0$, $\phi_{p,2} = \pi$, то есть при ориентации оси чувствительности акселерометра вверх и вниз, погрешности горизонтирования в первом приближении на точность калибровки не влияют. Такие ориентации удовлетворяют и другим критериям оптимизации: определитель основной матрицы линейной системы уравнений (3) принимает максимальное значение, а ее число обусловленности равно единице.

Если при решении уравнений (3) допустить, что входная ось калибруемого акселерометра точно выставлена вдоль вертикали, погрешности калибровки будут пропорциональны квадратам углов отклонений этих осей от вертикали и применение итерационной процедуры не поможет повысить точность оценки. Действительно, соотношения (5), (6) при $\phi_{p,1} = 0$, $\phi_{p,2} = \pi$, $\hat{w}_{p,1} \approx g$, $\hat{w}_{p,2} \approx -g$ с точностью до членов второго порядка малости принимают вид:

$$\delta(k_p^A) = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(\Delta\phi_{p,1})^2 + (\Delta\phi_{p,2})^2}{2} \right); \quad \delta(\Delta\dot{w}_p) = -\frac{g}{2} \cdot \left(\frac{(\Delta\phi_{p,1})^2 + (\Delta\phi_{p,2})^2}{2} \right),$$

где в данном случае $\delta\phi_{p,1} = \Delta\phi_{p,1}$, $\delta\phi_{p,2} = \Delta\phi_{p,2}$ – углы отклонения осей калибруемых акселерометров от вертикали в первой и во второй ориентациях.

Эти углы при любых программных ориентациях могут быть оценены по показаниям датчиков БИИБ. Найдем погрешности калибровки для этого случая. В работе [9] показано, что при аналитической выставке БИНС минимальными погрешностями, эквивалентными погрешностям физического гироскопирования, характеризуется алгоритм TRIAD с базовым единичным вектором, направленным вдоль местной вертикали. Этот алгоритм используется в рассматриваемой методике при расчете матрицы перехода $\hat{L}$ от приборной системы координат к географической.

Смещения нуля и погрешности масштабных коэффициентов акселерометров будем оценивать с помощью того же соотношения (4), в котором в качестве фактических проекций кажущегося ускорения $g \cos\phi_{p,1}$, $g \cos\phi_{p,2}$ на оси калибруемых акселерометров будем использовать значение ускорения силы тяжести, пересчитанное с помощью матрицы $\hat{L}^T$ из осей ГСК в оси ПСК. В этом случае фигурирующие в соотношениях (5), (6) погрешности горизонтирования $\delta\phi_{p,1}$, $\delta\phi_{p,2}$ будут представлять собой не сами углы отклонения осей от вертикали, а погрешности их оценки $\delta(\Delta\phi_{p,1})$, $\delta(\Delta\phi_{p,2})$, которые выражаются через погрешности акселерометров [9].

Выражения для средних квадратических отклонений (СКО) погрешностей

калибровки, если предполагаются нулевые математические ожидания и некоррелированность оцениваемых параметров, будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{\hat{k}_x^A} &\leq \Delta\phi_{\max} \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta\dot{w}}^2}{g^2} + \sigma_{\alpha}^2}; \quad \sigma_{\Delta\dot{w}_x} \leq \Delta\phi_{\max} \sqrt{\sigma_{\Delta\dot{w}}^2 + \sigma_{\alpha}^2 \cdot g^2}; \\ \sigma_{\hat{k}_y^A} &\leq \Delta\phi_{\max} \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta\dot{w}}^2}{g^2} + \frac{1}{2}\sigma_{\alpha}^2}; \quad \sigma_{\Delta\dot{w}_y} \leq \Delta\phi_{\max} \sqrt{\sigma_{\Delta\dot{w}}^2 + \frac{1}{2}\sigma_{\alpha}^2 \cdot g^2}; \\ \sigma_{\hat{k}_z^A} &\leq \Delta\phi_{\max} \cdot \frac{\sigma_{\Delta\dot{w}}}{g}; \quad \sigma_{\Delta\dot{w}_z} \leq \Delta\phi_{\max} \cdot \sigma_{\Delta\dot{w}},\end{aligned}\quad (7)$$

где $\sigma_{\Delta\dot{w}_r}, \sigma_{\hat{k}_r^A}, r=x,y,z$ – СКО погрешностей оценки смещений нуля и масштабных коэффициентов; $\Delta\phi_{\max} = \max(|\Delta\phi_{p,1}|, |\Delta\phi_{p,2}|)$ – максимальное значение угла отклонения оси калибруемого датчика от вертикали; $\sigma_{\Delta\dot{w}}, \sigma_{\alpha}$ – СКО смещений нуля и погрешностей углов взаимной ориентации осей чувствительности акселерометров, определяемые нестабильностью этих параметров от запуска к запуску.

Как видно из соотношений (7), погрешности калибровки имеют порядок произведений углов отклонения осей калибруемых акселерометров от вертикали и оцениваемых параметров. При отклонениях до $30'$ относительные погрешности калибровки будут менее 1%. При отклонениях на уровне $1-2^\circ$ относительные погрешности калибровки возрастут до 1,7-3,5%, что дает две верные значащие цифры. Повысить точность калибровки можно с помощью итерационной процедуры. После второй итерации относительные погрешности калибровки будут менее 1%.

Смещения нуля и масштабные коэффициенты каждого акселерометра оцениваются отдельно, то есть имеет место декомпозиция уравнений измерения. По этой причине рассмотренный способ калибровки, без усложнения алгоритмов, применим для произвольной взаимной ориентации осей чувствительности акселерометров, в частности для неортогональной ориентации осей акселерометров в избыточных БИИБ.

Оценка углов взаимной ориентации осей чувствительности

Для определения угла между осями чувствительности двух акселерометров их целесообразно ориентировать в вертикальной плоскости. Если при этом выставить оси чувствительности акселерометров симметрично относительно горизонтальной плоскости, можно показать, что отклонение оценки угла между ними от его истинного значения, рассматриваемое как функция погрешностей масштабных коэффициентов и смещений нуля этих акселерометров, примет минимальное значение. Действительно, пусть угол между вертикалью и осью чувствительности первого акселерометра равен α , второго акселерометра – β . Угол между осями чувствительности, равный $\beta-\alpha$, оценивается без методических погрешностей с помощью соотношения

$$\angle(O\alpha, O\beta) = \vartheta = \beta - \alpha = \arccos \frac{\hat{w}_\beta}{g} - \arccos \frac{\hat{w}_\alpha}{g}, \quad (8)$$

где $\hat{w}_\beta, \hat{w}_\alpha$ – показания соответствующих акселерометров.

Дисперсия погрешности оценки угла ϑ , обусловленная смещениями нуля и погрешностями масштабных коэффициентов акселерометров, угол между осями которых оценивается, для равноточных акселерометров с некоррелированными погрешностями имеет вид:

$$D_{\delta\vartheta} = \left(\frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right) D_{k^A} + \left(\frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{1}{\sin^2 \alpha} \right) \frac{D_{\Delta\dot{w}}}{g^2}. \quad (9)$$

При номинальном угле между осями чувствительности, равном $\frac{\pi}{2}$, минимизация по α обоих выражений при дисперсиях погрешностей в правой части соотношения (9) имеет место при $\alpha = \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{3\pi}{4}$. Отметим, что условие симметричности выставки осей чувствительности относительно горизонтальной плоскости справедливо для любых $\vartheta \leq \frac{\pi}{2}$. При $\vartheta > \frac{\pi}{2}$ симметричность должна быть обеспечена относительно вертикали.

Для грубых поворотных столов соотношение (8) не является точным, поскольку плоскость, образованная осями чувствительности акселерометров $O\alpha\beta$, может не быть строго вертикальной. В этом случае необходимо учитывать малый угол поворота БИИБ вокруг оси, лежащей на пересечении плоскости $O\alpha\beta$ и горизонтальной плоскости. Этот малый угол для ортогональной триады можно оценить по показаниям третьего акселерометра γ , ориентированного горизонтально. Соотношение для угла между осями чувствительности акселерометров в этом случае принимает вид:

$$\vartheta = \arccos \frac{\hat{w}_\beta}{\sqrt{g^2 - (\hat{w}_\gamma)^2}} - \arccos \frac{\hat{w}_\alpha}{\sqrt{g^2 - (\hat{w}_\gamma)^2}}. \quad (10)$$

Аналитическое оценивание отклонений полученных углов от их истинных значений при линеаризации синусов и косинусов углов рассогласования фактического и программного положений ПСК вокруг горизонтальных осей с точностью до величин первого порядка малости относительно оцениваемых величин приводит к соотношениям:

$$\begin{aligned} \delta\alpha_{yx} &\approx -k_{y'}^A - k_{x'}^A + \frac{\sqrt{2}}{g} (\Delta\dot{w}_{x'} - \Delta\dot{w}_{y'}) + \frac{2\psi \cdot \Delta\dot{w}_{z'}}{g} + \sqrt{2}\psi \cdot (\alpha_{zy} - \alpha_{zx}), \\ \delta\alpha_{zx} &\approx -k_{z'}^A - k_{x'}^A + \frac{\sqrt{2}}{g} (\Delta\dot{w}_{z'} - \Delta\dot{w}_{x'}) + \frac{2\psi \cdot \Delta\dot{w}_{y'}}{g} + \sqrt{2}\psi \cdot (\alpha_{yx} - \alpha_{zy}), \\ \delta\alpha_{zy} &\approx -k_{z'}^A - k_{y'}^A + \frac{\sqrt{2}}{g} (\Delta\dot{w}_{y'} - \Delta\dot{w}_{x'}) + \frac{2\psi \cdot \Delta\dot{w}_{x'}}{g} + \sqrt{2}\psi \cdot (\alpha_{zx} - \alpha_{yx}), \end{aligned} \quad (11)$$

где ψ – угол отклонения от программного положения вокруг оси, лежащей на пересечении плоскости, образованной осями акселерометров, угол между которыми определяется в данной ориентации, и горизонтальной плоскости.

Для проверки аналитических соотношений в среде MATLAB была разработана программа, моделирующая показания датчиков, их погрешности и алгоритмы калибровки. С помощью этой программы погрешности калибровки рассчитывались как разности между оцененными и задаваемыми параметрами. Расчеты с помощью соотношений (11) с точностью до трех значащих цифр совпадают с результатами моделирования.

Как видно из (11), основное влияние на точность оценки оказывают смещения нуля и погрешности масштабных коэффициентов акселерометров, угол между осями которых оценивается. Если оценить эти параметры предварительно, суммарные погрешности калибровки углов неортогональности будут не более 10%. Так же как и для масштабных коэффициентов и смещений нуля, во-первых, итерационная процедура позволяет повысить точность калибровки (после второй итерации относительные погрешности калибровки будут на уровне 1-2%); во-вторых, имеет место декомпозиция уравнений измерения; в-третьих, калибровка углов между осями чувствительности акселерометров может быть проведена при любой их взаимной ориентации. Кроме того, соотношения (11) и (7) позволяют по заданным погрешностям калибровки определить требования к погрешностям выставки осей БИИБ в заданное программное положение, которые обусловлены в основном погрешностями стендового оборудования, то есть решить обратную задачу.

Скалярный метод калибровки

Альтернативой описанному выше последовательному векторному способу калибровки акселерометров является скалярный способ [10], при котором первые два этапа калибровки совмещаются. При скалярной калибровке в качестве эталона используются модули измеряемых векторов ускорения силы тяжести и скорости вращения Земли, которые, как правило, в месте проведения калибровки известны с высокой точностью. В результате разностный сигнал измерения формируется практически идеально, при этом уравнения измерения могут быть линеаризованы. Оценим погрешности скалярного метода калибровки для ортогональной триады акселерометров.

Пусть L_k – ортогональная матрица перехода от ПСК к ГСК в k -й программной ориентации. Нормированная (делением на $2g^2$) разность между суммой квадратов компонент измеренного вектора и квадратом модуля ускорения силы тяжести с точностью до членов первого порядка малости относительно оцениваемых величин имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta z_k = \frac{\hat{w}_k^2 - g^2}{2g^2} = & k_{x'}^A \left(l_k^{(21)} \right)^2 + k_{y'}^A \left(l_k^{(22)} \right)^2 + k_{z'}^A \left(l_k^{(23)} \right)^2 + l_k^{(21)} l_k^{(22)} \alpha_{yx} + \\ & + l_k^{(21)} l_k^{(23)} \alpha_{zx} + l_k^{(22)} l_k^{(23)} \alpha_{zy} + l_k^{(21)} \frac{\Delta \dot{w}_{x'}}{g} + l_k^{(22)} \frac{\Delta \dot{w}_{y'}}{g} + l_k^{(23)} \frac{\Delta \dot{w}_{z'}}{g}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\hat{w}_k^2 = (\hat{w}_{k,x'})^2 + (\hat{w}_{k,y'})^2 + (\hat{w}_{k,z'})^2$; $l_k^{(2j)}$, $j=1,2,3$, – косинусы между соответствующими осями ПСК и вертикальной осью.

Соотношение (12) представляет собой линейное уравнение измерения в k -й программной ориентации. Его коэффициенты являются функциями компонентов матрицы направляющих косинусов между ПСК и ГСК, то есть знание ориентации осей датчиков относительно ГСК необходимо и при скалярной калибровке – для разделения погрешностей на составляющие в соответствии с моделью точностных параметров. Эти коэффициенты либо оцениваются по показаниям тех же акселерометров, либо определяются через компоненты программной матрицы.

При использовании метода наименьших квадратов параметры акселерометров оцениваются с помощью соотношения:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T \Delta Z, \quad (13)$$

где $\Delta Z = [\Delta z_1, \Delta z_2 \dots \Delta z_K]^T$, K – количество программных ориентаций;

$$h_k = \left[l_k^{(21)}, l_k^{(22)}, l_k^{(23)}, \left(l_k^{(21)} \right)^2, \left(l_k^{(22)} \right)^2, \left(l_k^{(23)} \right)^2, -l_k^{(21)} l_k^{(22)}, l_k^{(21)} l_k^{(23)}, -l_k^{(22)} l_k^{(23)} \right] - k\text{-я}$$

строка матрицы H .

Методические погрешности алгоритма калибровки обусловлены:

- 1) линеаризацией компонентов матрицы (1);
- 2) линеаризацией уравнений измерения (12);
- 3) погрешностями знания коэффициентов в правых частях уравнений (12).

Первые две группы методических погрешностей легко оцениваются аналитически и имеют второй порядок малости относительно определяемых величин. Оценим погрешности, обусловленные неточностью знания коэффициентов уравнения (12). Пусть $\hat{X} = X + \delta X$ – решение уравнения $\Delta Z = \hat{H} X$, где $\hat{H} = H + \delta H$, δH – матрица аддитивных погрешностей знания коэффициентов уравнения $\Delta Z = H X$. После преобразований

$$\Delta Z = \hat{H} \cdot \hat{X} = (H + \delta H)(X + \delta X) = H \cdot X + \delta H \cdot X + H \cdot \delta X + \delta H \cdot \delta X$$

и сохранения членов первого порядка малости получим:

$$\delta X = - (H^T H)^{-1} \cdot H^T \cdot \delta H \cdot X. \quad (14)$$

Для тех же девяти программных ориентаций рассматриваемой методики матрица H – квадратная, решение уравнений (12) принимает вид $X = H^{-1} \Delta Z$, а соотношение (14) – вид $\delta X = -H^{-1} \delta H \cdot X$. При расчетной программной матрице погрешности скалярной калибровки имеют порядок квадратов оцениваемых величин, в частности для масштабных коэффициентов:

$$\delta k_{x'}^A \approx \frac{(\Delta \dot{w}_{y'})^2 + (\Delta \dot{w}_{z'})^2}{g^2}; \quad \delta k_{y'}^A \approx \frac{(\Delta \dot{w}_{z'})^2 + (\Delta \dot{w}_{x'})^2}{g^2}; \quad \delta k_{z'}^A \approx \frac{(\Delta \dot{w}_{x'})^2 + (\Delta \dot{w}_{y'})^2}{g^2}. \quad (15)$$

Если в качестве L_k использовать программные матрицы ориентации, то есть пренебречь погрешностями калибровочного оборудования, погрешности калибровки, обусловленные погрешностями коэффициентов уравнений измерения, будут иметь порядок произведения оцениваемых параметров на углы отклонения ПСК от программного положения в горизонтальной плоскости. Таким образом, методические погрешности скалярного метода при использовании грубого поворотного стола могут быть существенно меньше погрешностей рассмотренного выше последовательного метода.

Преимуществом рассматриваемого последовательного метода является то, что он существенно упрощает алгоритмы и позволяет провести аналитическое оценивание точности калибровки не только ортогональной триады, но и избыточного блока акселерометров с неортогонально ориентированными осями чувствительности.

Оценка смещений нуля ДУС

Приемлемая с практической точки зрения точность оценки смещений нуля ДУС, при условии что их величины, по крайней мере, на порядок меньше величины скорости вращения Земли, может быть обеспечена прямыми методами при длительности программной ориентации, необходимой для осреднения шумов ДУС. При этом погрешности масштабных коэффициентов и углов привязки осей ДУС к осям ПСК приводят к погрешностям калибровки, которые легко оцениваются аналитически и на один-два порядка меньше смещений нуля ДУС. Итерационная процедура позволяет уменьшить эти погрешности.

При векторном способе калибровки смещение нуля ДУС определяется как разность между измеренным значением $\hat{\omega}_q$, $q = x'', y'', z''$ и пересчитанной на его ось чувствительности проекцией скорости вращения Земли $\omega_{r,эм}$, $r = x, y, z$. Погрешности формирования этой проекции являются еще одним источником погрешностей. Их также можно оценить аналитически:

$$\begin{bmatrix} \delta\omega_{x,эм} \\ \delta\omega_{y,эм} \\ \delta\omega_{z,эм} \end{bmatrix} = L^T \cdot (\Delta L - E) \begin{bmatrix} \Omega \cos B \\ \Omega \sin B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta\dot{\omega}_N}{g} \Omega (l_{11} \sin B - l_{21} \cos B) + l_{31} \delta\omega_E \\ \frac{\delta\dot{\omega}_N}{g} \Omega (l_{12} \sin B - l_{22} \cos B) + l_{32} \delta\omega_E \\ \frac{\delta\dot{\omega}_N}{g} \Omega (l_{13} \sin B - l_{23} \cos B) + l_{33} \delta\omega_E \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где Ω – величина скорости вращения Земли, B – широта, L – матрица перехода от ПСК, ΔL – матрица рассогласования, выражаемая через погрешности датчиков БИИБ [9].

Если выставить ось чувствительности калибруемого ДУС вдоль вектора скорости вращения Земли, направляющие косинусы этой оси в ГСК будут иметь вид: $l_{1i} = \cos B$, $l_{2i} = \sin B$, $l_{3i} = 0$, $i = 1, 2, 3$, для $\delta\omega_{q,эм}$, $q = x, y, z$ соответственно. Как видно из (16), в этом случае погрешности датчиков в первом приближении не будут влиять на точность формирования проекций вектора скорости вращения Земли.

При отклонении осей ПСК от программного положения погрешность оценки проекции скорости вращения Земли при установке вдоль оси мира, например оси ДУС OX , в первом приближении относительно углов отклонения составит

$$\delta\omega_{x,эм} \approx -\Delta\theta \cdot \Omega \frac{\delta\dot{w}_N}{g} + (\Delta\psi \cdot \sin B + \Delta A \cdot \cos B) \delta\omega_E, \quad (17)$$

где $\Delta\psi, \Delta A, \Delta\theta$ – углы отклонения от программного положения, приведенные соответственно к северной, вертикальной и восточной осям ГСК.

Эта погрешность имеет порядок произведения углов отклонения на оцениваемые величины. При углах отклонения на уровне 1° относительная погрешность калибровки смещений нуля ДУС составит не более 3%. Аналогичные соотношения получаются для $\delta\omega_{y,эм}$, $\delta\omega_{z,эм}$.

Смещение нуля ДУС может быть с требуемой на практике точностью откалибровано и при вертикальной ориентации его оси чувствительности. Это позволит не вводить дополнительные программные ориентации, а использовать те, в которых оцениваются смещения нуля и погрешности масштабных коэффициентов акселерометров, увеличив при этом их длительность до требуемой для осреднения шумов ДУС величины. Результаты оценки точности такой калибровки с помощью математического моделирования приведены в работе [11]. Аналитическое соотношение для оценки погрешности имеет вид:

$$\delta\omega_{x,эм} \approx (\Omega \cos B + \Delta\theta \cdot \Omega \sin B) \frac{\delta\dot{w}_N}{g} + \Delta A \left(\Delta\psi \cdot \Omega \sin B \frac{\delta\dot{w}_N}{g} + \Delta\theta \cdot \delta\omega_E \right) + \Delta\psi \delta\omega_E. \quad (18)$$

В этом случае влияние азимутального угла рассогласования имеет второй порядок малости, однако появляется дополнительная составляющая $\Omega \cos B \frac{\delta\dot{w}_N}{g}$,

характеризующаяся погрешностью на уровне погрешностей акселерометров и обусловленная погрешностями аналитического горизонтирования. Ее можно уменьшить, предварительно откалибровав акселерометры. В частности, суммарные погрешности калибровки акселерометров, имеющие уровень 10^{-4} м/с^2 , приводят к погрешности калибровки смещения нуля вертикального ДУС на уровне $1,5 \cdot 10^{-4} \cos B \text{ }^\circ/\text{с}$. Таким же уровнем погрешностей характеризуется способ оценки смещений нуля горизонтальных ДУС при двухпозиционном гироскопировании [12], который также может быть реализован при программных ориентациях и разворотах, предусмотренных методикой.

Обеспечить погрешности оценки смещений нуля ДУС на уровне второго порядка малости относительно оцениваемых величин можно, как и для акселерометров, применением скалярного метода. Аналитические соотношения для этих погрешностей выводятся аналогично соотношениям для погрешностей калибровки акселерометров (15).

Аналитические соотношения для погрешностей оценки смещений нуля ДУС также были проверены с помощью программы, моделирующей в среде MATLAB процесс калибровки, и совпали с результатами моделирования для векторного метода с точностью до трех значащих цифр, для скалярного метода – с точностью до двух значащих цифр.

Оценка масштабных коэффициентов и углов привязки осей чувствительности ДУС к ПСК

Оценка масштабных коэффициентов и углов ориентации осей чувствительности ДУС относительно осей ПСК осуществляется с помощью косвенного метода [13]. Процедура косвенной калибровки состоит из серии разворотов и фиксированных относительно ГСК ориентаций до и после каждого разворота. В процессе разворотов реализуются «быстрые» алгоритмы БИНС: по показаниям ДУС оценивается матрица направляющих косинусов между приборной и географической системами координат, с помощью которой показания акселерометров в фиксированном положении в конце каждого разворота пересчитываются в географическую систему координат. Для каждого разворота сигнал измерения формируется как разность горизонтальных составляющих ускорения в конце и в начале разворота.

В работе [14] приведены анализ существующих версий косвенного метода, описание используемой в НПО автоматики версии метода и ее аналитическая оценка точности. Процедура калибровки предусматривает три серии разворотов, в каждой серии осуществляются три разворота на 180° : два вокруг северной и один вокруг вертикальной оси. В начале каждой серии оси ПСК устанавливаются последовательно вдоль осей разворотов. Существующий набор фиксированных ориентаций позволяет с описанной выше точностью оценить прямыми методами масштабные коэффициенты акселерометров и смещения нуля акселерометров и ДУС.

Относительные погрешности оценки масштабных коэффициентов и углов неортогональности ДУС с помощью косвенного метода согласно полученным аналитическим оценкам составляют для первой итерации 7-8%, для второй – 1-2%, что подтверждается результатами математического моделирования [15].

Результаты калибровки реального БИИБ

Рассматриваемая методика была применена при стендовых испытаниях реального блока чувствительных элементов (БЧЭ), в качестве которого использовался БЧЭ-501 разработки НПК «Оптолинк», содержащий три волоконно-оптических гироскопа (ВОГ) и три маятниковых акселерометра со взаимно ортогональными осями чувствительности.

Процедура калибровки включала программные фиксированные ориентации и развороты, используемые при косвенной калибровке, к которым были добавлены программные ориентации для калибровки углов взаимной ориентации акселерометров – оси чувствительности акселерометров, образующие оцениваемый угол, ориентировались в вертикальной плоскости симметрично горизонтальной плоскости вверх и вниз. Точностные параметры оценивались по семи запускам прибора, процедура обработки включала две итерации: при расчетах во второй итерации по каждому запуску учитывались значения параметров, полученные в соответствующем запуске при первой итерации, в результате оценки, полученные во второй итерации, характеризовали погрешности оценок, полученных в первой итерации. При калибровке акселерометров использовались алгоритмы как последовательного векторного, так и скалярного методов. Смещения нуля ДУС не оценивались, поскольку для ВОГ БЧЭ-501 эти параметры имеют один и тот же уровень нестабильности от запуска к запуску и в запуске.

Средние по семи запускам значения оценок параметров акселерометров для первой и второй итераций, а также разница оценок последовательного векторного и скалярного методов по сумме двух итераций (% от оценки, полученной скалярным методом), приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значения, полученные во второй итерации, меньше, чем значения, полученные в первой итерации: для последовательного метода – на 1-3 порядка, для скалярного метода – на 3-4 порядка, а результаты оценки двумя различными методами близки между собой.

Средние по семи запускам значения оценок погрешностей косвенной калибровки для первой и второй итераций приведены для масштабных коэффициентов в табл. 2, для углов привязки осей чувствительности ДУС к осям ПСК – в табл. 3.

Относительные погрешности калибровки (% второй итерации от первой) составляют для масштабных коэффициентов 0,1–1,6%; для погрешностей углов привязки осей ДУС, оцениваемое значение которых более 8", – 1–9%, для малого угла γ_{yx} (3,41") – 15,7%, для малого угла γ_{zx} (2,72") значения, полученные при первой и второй итерациях, близки, что соответствует результатам математического моделирования [15]. Повышенные относительные погрешности оценки малых углов связаны с тем, что оцениваемая величина становится близка к погрешности калибровки, обусловленной нестабильностью параметров в запуске.

Т а б л и ц а 1

Оценки точностных параметров акселерометров прибора БЧЭ-501

Параметр	Последовательная векторная калибровка		Скалярная калибровка		Разница оценок методов, %
	1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация	
$\Delta \dot{w}_{x'}$, м/с ²	1,35·10 ⁻³	5,4·10 ⁻⁶	1,37·10 ⁻³	-5,5·10 ⁻⁷	-0,62%
$\Delta \dot{w}_{y'}$, м/с ²	2,75·10 ⁻³	-3,8·10 ⁻⁶	2,75·10 ⁻³	-2,15·10 ⁻⁷	0,08%
$\Delta \dot{w}_{z'}$, м/с ²	-1,30·10 ⁻⁴	2,7·10 ⁻⁵	-1,02·10 ⁻⁴	-1,15·10 ⁻⁷	1,13%
$k_{x'}^A$, б/р	-3,48·10 ⁻⁵	-1,2·10 ⁻⁶	-3,63·10 ⁻⁵	5,5·10 ⁻⁸	-0,75%
$k_{y'}^A$, б/р	-2,13·10 ⁻⁵	8,5·10 ⁻⁸	-1,90·10 ⁻⁵	-3,8·10 ⁻⁹	11,46%
$k_{z'}^A$, б/р	-1,17·10 ⁻⁵	-1,9·10 ⁻⁷	-1,34·10 ⁻⁵	5,37·10 ⁻⁸	-10,47%
α_{yx} , угл. с	-42,81	-0,50	-42,96	-0,011	0,79%
α_{zx} , угл. с	14,71	-0,18	13,80	0,008	5,28%
α_{zy} , угл. с	26,63	0,38	26,88	-0,012	0,51%

Т а б л и ц а 2

Оценки погрешностей масштабных коэффициентов ДУС прибора БЧЭ-501, б/р

$k_{x''}^G$		$k_{y''}^G$		$k_{z''}^G$	
1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация
6,46·10 ⁻⁵	9,5·10 ⁻⁷	1,08·10 ⁻⁴	-8,3·10 ⁻⁸	9,65·10 ⁻⁵	1,53·10 ⁻⁶

**Оценки погрешностей углов привязки осей чувствительности ДУС
к осям ПСК прибора БЧЭ-501, угл. с**

γ_{xy}		γ_{xz}		γ_{yz}		γ_{yx}		γ_{zx}		γ_{zy}	
1 ит.	2 ит.	1 ит.	2 ит.	1 ит.	2 ит.	1 ит.	2 ит.	1 ит.	2 ит.	1 ит.	2 ит.
-8,14	0,09	-13,88	-1,19	-16,84	1,52	-3,41	0,54	2,72	2,20	16,40	-1,16

Заключение

Методика калибровки БИИБ, разработанная в НПО автоматики, позволяет оценивать точностные параметры БИИБ среднего и навигационного класса точности с относительными погрешностями не более единиц процентов. Методика обеспечивает наблюдаемость всех оцениваемых параметров при минимальном количестве программных ориентаций и разворотов и применима к оценке точностных параметров акселерометров и смещений нуля ДУС избыточных БИИБ.

Полученные аналитические соотношения для погрешностей калибровки могут быть использованы для решения обратной задачи – определения требований к погрешностям стендового оборудования.

Погрешности калибровки реального БИИБ, оцениваемые по вторым итерациям, полностью соответствуют результатам теоретической оценки. Разработанную методику предполагается использовать при проверке точностных характеристик БИИБ для систем управления перспективных изделий ракетно-космической техники, что не ограничивает ее применения для БИИБ различного класса точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилова И.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Парусников Н.А. Сравнительный анализ различных вариантов калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 249–251.
2. Бельский Л.Н., Водичева Л.В. Ускоренная прецизионная начальная выставка и калибровка ИНС летательного аппарата на подвижном основании // Гироскопия и навигация. 2001. № 4 (35). С. 3–18.
3. Savage, P.G., Strapdown System Performance Analysis, *RTO Lecture Series 232 (2004)*, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, St. Petersburg, 2004, pp. 4-1–4-33.
4. Zhang, H., Wu, Y., Wu, W., Wu, M., and Hu, X., Improved Multi-Position Calibration for Inertial measurement Units, *Meas. Science Technol.*, 2010. 21 015107.
5. Wu, Q., Wu, R., Han, F., and Zhang, R., A Three-Stage Accelerometer Self-Calibration Technique for Space-Stable Inertial Navigation Systems, *Sensors*, 2018, 18, 2888.
6. Голован А.А., Матасов А.И. Применение гарантирующего подхода для калибровки акселерометров на высокоточном стенде // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 241–243.
7. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Синтез оптимальных программ калибровки акселерометров БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 5. С. 3–17.
8. Fong, W.T., Ong, S.K., and Nee, A.Y.C., Method for In-Field User Calibration of an Inertial Measurement Unit without External Equipment, *Meas. Science Technol.*, 2008, 19 085202.
9. Водичева Л.В., Алиевская Е.Л., Парышева Ю.В. Начальная выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы на неподвижном основании: методы и их погрешности // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 71–74.

10. **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.: ГНЦ РФ «ЦНИИ Электроприбор», 2008. С. 145–154.
11. **Бельский Л.Н., Водичева Л.В., Парышева Ю.В., Алиевская Е.Л.** Повышение точности гироскопирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы при предстартовом подъеме летательного аппарата // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2012. С. 104–106.
12. **Водичева Л.В., Парышева Ю.В., Алиевская Е.Л.** Предстартовая выставка и калибровка гибридной инерциальной измерительной системы // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2014. С. 316–318.
13. **Diesel, J.W.,** Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial Navigation System, *Thirteenth Biennial Guidance Test Symposium. Holloman Air Force Base, New Mexico*, 1987, vol. 1, SO1A, pp. 1–37.
14. **Водичева Л.В., Парышева Ю.В.** Методика оценки точности косвенного метода калибровки бесплатформенного инерциального измерительного блока // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2019. С. 193–203.
15. **Парышева Ю.В., Водичева Л.В.** Оценка точности и результаты калибровки бесплатформенного измерительного блока для средств выведения // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2018. С. 62–72.

Vodicheva, L.V., Parysheva, Yu.V. (Scientific and Production Association of Automatics Named after Academician N.A. Semikhatov, Yekaterinburg)

Estimation of Sensor Accuracy Parameters in a Strapdown Inertial Measurement Unit Using a Relatively Rough Turntable, *Гироскопия и Навигация*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 162–178.

Abstract. A method for sensors calibration in a strapdown inertial measurement unit on a relatively rough (1-2°) turntable is proposed, which integrates direct and indirect techniques. The calibration errors are estimated analytically and by mathematical modeling. For direct techniques, the choice of programmed attitudes is explained, and the vector and scalar methods are compared. The results of the method application for calibrating a measurement unit based on fiber-optic gyroscopes are presented.

Key words: strapdown inertial measuring unit, angular rate sensors, accelerometers, scalar calibration, indirect calibration.

REFERENCES

1. **Vavilova, I.B., Golovan, A.A., Kozlov, A.V., Papusha, I.A. and Parusnikov, N.A.** Comparative study of several variants of strapdown inertial navigation system calibration, *Proc. 25th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2018, pp. 249–251.
2. **Bel'skii, L.N. and Vodicheva, L.V.,** Rapid high-precision initial adjustment and calibration of inertial navigation system of a flight vehicle with movable platform, *Гироскопия и навигация*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 3–18.
3. **Savage, P.G.,** Strapdown system performance analysis, *RTO Lecture Series 232 (2004), Advances in Navigation Sensors and Integration Technology*, St. Petersburg, 2004, pp. 4-1–4-33.
4. **Zhang, H., Wu, Y., Wu, W., Wu, M., and Hu, X.,** Improved multi-position calibration for inertial measurement units, *Measurement Science and Technology*, 2010, vol. 21, no. 1, 015107.
5. **Wu, Q., Wu, R., Han, F., and Zhang, R.,** A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, 2888.

6. **Golovan, A.A. and Matasov, A.I.**, Application of guaranteed approach for the calibration of accelerometer unit on high-precision motion simulator, *Proc. 24th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2017, pp. 241–243.
7. **Egorov, Yu.G. and Dzuev, A.A.**, Synthesis of optimal calibration programs for SINS accelerometers, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2017, No. 5, pp. 3–17.
8. **Fong, W.T., Ong, S.K., and Nee, A.Y.C.**, Method for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment, *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, 085202.
9. **Vodicheva, L.V. and Parysheva, Yu.V.**, Initial alignment of a strapdown inertial navigation system on a stationary base: Methods and their errors, *Proc. 20th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2013, pp. 71–74.
10. **Izmailov, E.A., Lepe, S.N., Molchanov, A.V. and Polikovskii, E.F.**, Scalar calibration and balancing method for strapdown inertial navigation systems, *Proc. 15th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2008, pp. 145–154.
11. **Bel'skii, L.N., Vodicheva, L.V., Parysheva, Yu.V. and Alievskaya, E.L.**, Accuracy improvement of strapdown INS gyrocompassing under prelaunch lifting of a spacecraft, *Proc. 19th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2012, pp. 104–106.
12. **Vodicheva, L.V., Parysheva, Yu.V. and Alievskaya, E.L.**, Prelaunch alignment and calibration of a hybrid inertial measurement system, *Proc. 21st St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2014, pp. 316–318.
13. **Diesel, J.W.**, Calibration of a ring laser gyro inertial navigation system, *Thirteenth Biennial Guidance Test Symposium. Holloman Air Force Base, New Mexico*, 1987, vol. 1, SO1A, pp. 1–37.
14. **Vodicheva, L.V. and Parysheva, Yu.V.**, Error analysis technique for indirect method of calibration of a strapdown inertial measurement unit, *Proc. 26th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2019, pp. 193–203.
15. **Parysheva, Yu.V. and Vodicheva, L.V.**, Strapdown measurement unit accuracy estimation and calibration results for launch vehicles, *Proc. 31st Conference in Memory of N.N. Ostryakov*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2018, pp. 62–72.

Материал поступил 09.02.2019