

Ю. Г. ЕГОРОВ, А. А. ДЗУЕВ, Е. А. ПОПОВ

## СИНТЕЗ ПРОГРАММ КАЛИБРОВКИ БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ БИНС ПРИ ИНВАРИАНТНОМ ПОДХОДЕ

*В статье рассматриваются вопросы, касающиеся синтеза и исследования точности, обеспечиваемой программами калибровки блока акселерометров бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) в рамках инвариантного подхода. Сформулированы критерии синтеза и дополнительные требования, которым должны удовлетворять программы калибровки. Проведен сравнительный анализ точностных характеристик различных программ калибровки.*

**Ключевые слова:** акселерометр, блок акселерометров, калибровка, программа калибровки, измерительное положение.

### Введение

При калибровке блока акселерометров (БА) наибольшее распространение получили способы с использованием измерений акселерометров, которые ориентируются в заданных измерительных положениях (ИП) в поле силы тяжести (относительно вектора ускорения силы тяжести (УСТ)  $\bar{g}$ ) [1]. Одним из них является инвариантная калибровка, которая не требует использования точного испытательного оборудования и технологической оснастки для задания измерительных положений [2–14]. Это обусловлено тем, что значение модуля кажущегося ускорения (вектор УСТ) в ходе калибровки не зависит (инвариантно) от углового положения БА.

Суть инвариантного подхода заключается в формировании математической модели измерений БА, которая представляет собой либо композицию измерений триады акселерометров, приведенную к вертикальной оси географической системы координат [8–10, 13], либо скалярное произведение вектора измерений БА на самого себя [2, 4]:

$$\bar{J}_1(i) = \frac{\bar{W}(i)\bar{\eta}(i)}{\|\bar{g}\|} - 1,$$
$$\bar{J}_2(i) = \frac{\bar{W}(i)\bar{W}(i)}{\|\bar{g}\|^2} - 1.$$

---

**Егоров** Юрий Григорьевич. Доктор технических наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**Дзуев** Астемир Адамович. Кандидат технических наук, математик, АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс» (г. Раменское, Московская область).

**Попов** Евгений Александрович. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики» (Москва). Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Здесь  $\bar{J}_{1,2}(i)$  – нормированные композиции измерений БА в  $i$ -м ИП;  $\bar{W}(i) = (W_x(i) \ W_y(i) \ W_z(i))^T$  – вектор измерений БА в  $i$ -м ИП;  $W_j$  – измерения  $j$ -го акселерометра ( $j = x, y, z$ );  $\bar{\eta}(i) = (\eta_x(i) \ \eta_y(i) \ \eta_z(i))^T$  – вектор, составленный из направляющих косинусов вертикали в осях приборного трехгранника в  $i$ -м ИП;  $\eta_j$  – направляющие косинусы вертикали относительно  $j$ -й оси приборного трехгранника ( $j = x, y, z$ );  $\|\bar{g}\|$  – модуль вектора УСТ.

Математическая модель измерений БА в  $i$ -м положении может быть приведена к следующему виду:

$$J(i) = h(i)\bar{X} + \varepsilon(i) + \omega(i), \quad (i = \overline{1, 3N}),$$

$$h(i) = (\eta_x(i) \ \eta_y(i) \ \eta_z(i) \ \eta_x(i)^2 \ \eta_y(i)^2 \ \eta_z(i)^2 \ \eta_x(i)\eta_y(i) \ \eta_x(i)\eta_z(i) \ \eta_y(i)\eta_z(i)),$$

$$\bar{X} = (\Delta_x \ \Delta_y \ \Delta_z \ \delta k_x \ \delta k_y \ \delta k_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{zy})^T.$$

Здесь  $h(i)$  – матрица измерений;  $\bar{X}$  – вектор инструментальных погрешностей БА;  $\Delta_j$  – смещение нуля  $j$ -го акселерометра ( $j = x, y, z$ );  $\delta k_j$  – погрешность масштабного коэффициента  $j$ -го акселерометра ( $j = x, y, z$ );  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{zy}$  – линейные комбинации параметров, характеризующих углы неортогональности осей чувствительности акселерометров;  $\omega(i)$  – случайная составляющая измерения;  $\varepsilon(i)$  – нелинейная составляющая измерения, влияние которой в данной статье не рассматривается.

Оценка вектора  $\bar{X}$  может быть получена посредством алгоритма метода наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{\bar{X}} = (H^T H)^{-1} H^T \bar{J},$$

$$H = (h(1) \ h(2) \ \dots \ h(N))^T, \quad \bar{J} = (J(1) \ J(2) \ \dots \ J(N))^T. \quad (1)$$

Здесь  $H$  – матрица измерений;  $\bar{J}$  – вектор измерений.

Совокупность всех ИП, реализуемых в ходе процедуры калибровки, составляет программу калибровки. При таком подходе трудозатраты (количество времени, необходимое для осуществления полного цикла калибровки) будут определяться: длительностью достижения установившегося теплового режима (состояния термодинамического равновесия); количеством ИП выбранной программы калибровки; длительностью регистрации измерений акселерометров в каждом ИП программы калибровки.

Необходимость обеспечить термодинамическое равновесие в ходе калибровки обусловлена допущением, что параметры математической модели калибровки БА в процессе набора измерений постоянны [11]. Чтобы снизить трудозатраты, авторы [11] включили в состав математической модели инструментальных погрешностей чувствительных элементов (ЧЭ) дополнительные параметры, характеризующие линейную температурную зависимость искомых параметров модели. Это позволило осуществить калибровку ЧЭ в условиях существенного изменения температуры окружающей среды. Указанная задача в [12] решена путем синтеза и применения итерационной процедуры уточнения температурной модели инструментальных погрешностей ЧЭ.

Длительность регистрации измерений акселерометров в каждом ИП программы калибровки определяется интенсивностью шумов измерительных каналов испытуемого блока акселерометров. Согласно [15], оптимальное время регистрации измерений испытуемых приборов, необходимое для определения величины метрологического эталона, может быть оценено с использованием вариации (дисперсии) Аллана [16–18].

Трудозатраты, обусловленные используемой программой калибровки, определяются количеством ИП, входящих в ее состав. В свою очередь, количество ИП программы калибровки определяется размерностью вектора инструментальных погрешностей  $\bar{X}$  модели калибровки и целевой точностью калибровки блока акселерометров. Снижение трудозатрат в этом случае может быть достигнуто уменьшением количества ИП, но при этом необходимо учитывать целевую точность калибровки БА. Таким образом, возрастает роль программ калибровки, содержащих рациональное количество ИП и обеспечивающих заданную точность калибровки.

Вопрос выбора рациональной программы калибровки БА в рамках инвариантного подхода рассматривался многими авторами [2–14, 19]. На практике широко применяется программа калибровки из класса одноосных поворотов, состоящая из 24 ИП: оси чувствительности каждой пары акселерометров ( $XY$ ,  $YZ$ ,  $ZX$ ) ориентируются в 8 симметричных ИП в вертикальной плоскости посредством их поворота вокруг горизонтальной оси [2, 4]. Такая программа характеризуется существенной избыточностью, что обеспечивает определение оценок 9 неизвестных параметров вектора  $\bar{X}$  по измерениям, сформированным в 24 ИП.

В настоящий момент существуют работы, в которых приводятся различные варианты сокращения числа ИП. Так, в [6, 13] предлагается исключить определенные ИП, что приводит к несимметричности программ; в [9] описываются минимально избыточные симметричные программы калибровки из класса двухосных поворотов (переход в каждое следующее положение может быть осуществлен одновременным поворотом вокруг двух осей стэнда).

Данная статья посвящена синтезу и исследованию точности, обеспечиваемой программами калибровки блока акселерометров БИНС в рамках инвариантного подхода в классе одноосных поворотов. Этот подход подразумевает, что программа калибровки содержит три группы ИП, в каждой из которых переход в каждое следующее положение программы осуществляется посредством поворота вокруг одной из осей стэнда, лежащей в плоскости горизонта.

### Постановка задачи

В работе синтез программ калибровки осуществляется с использованием двухстепенного испытательного стэнда. Схема установки блока акселерометров на испытательном стэнде представлена на рис. 1.

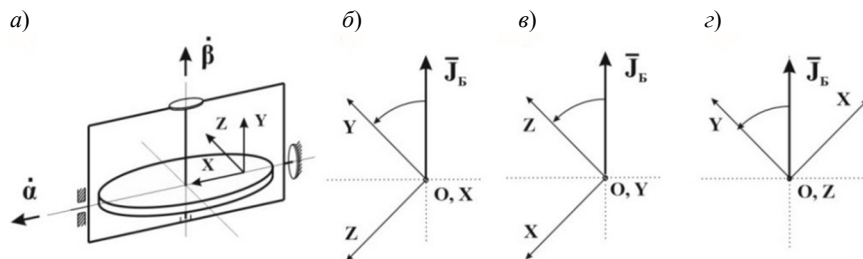


Рис. 1: а – схема установки блока акселерометров на испытательном стэнде; б – первая группа поворотов; в – вторая группа поворотов; г – третья группа поворотов

Здесь  $\alpha$  – угол поворота стенда вокруг внешней оси;  $\beta$  – угол поворота стенда вокруг внутренней оси;  $\bar{J}_B = (0 \ g \ 0)^T$  – вектор кажущегося ускорения, измеряемый акселерометрами в ходе проведения калибровки на испытательном стенде.

Поиск программ калибровки осуществляется в классе одноосных поворотов, осуществляемых в соответствии со схемой на рис. 1. Считается, что каждая из трех групп поворотов содержит  $N$  ИП. Следовательно, суммарное количество ИП синтезируемых программ калибровки будет составлять  $3N$ .

Синтез программ калибровки осуществляется с учетом следующих критериев: максимальное снижение влияния измерительного шума БА (остаточного, после усреднения) на точность определения оценок его инструментальных погрешностей; снижение трудозатрат на осуществление калибровки БА посредством выбора рационального количества ИП.

Дополнительным требованием к синтезируемым программам калибровки является обеспечение ИП, в которых ось чувствительности каждого из испытываемых приборов ориентируется в прямом и обратном направлениях относительно измеряемого вектора  $\bar{J}_B$ . Указанные ИП обеспечивают максимальное значение проекции измеряемого вектора на оси чувствительности испытываемых приборов, следовательно, необходимы для точного и достоверного определения оценок погрешностей масштабных коэффициентов акселерометров. Это обусловлено тем, что калибровка БА осуществляется в поле силы тяжести Земли (в качестве метрологического эталона выступает вектор ускорения силы тяжести Земли  $\mathbf{g}$ ). При этом ошибку определения погрешности масштабного коэффициента акселерометра можно приближенно оценить как случайную составляющую измерений, поделенную на модуль вектора  $\mathbf{g}$ . Следовательно, посредством ориентирования испытываемого акселерометра коллинеарно измеряемому вектору достигается максимум знаменателя указанного оценочного соотношения, соответствующий минимуму методической ошибки определения погрешности масштабного коэффициента. Кроме того, стоит отметить, что указанное в работе дополнительное требование можно рассмотреть с позиций теории планирования эксперимента. Под планом эксперимента подразумевается совокупность величин  $\xi_N$  [20]

$$\xi_N = \{y_1, \dots, y_N; p_1, \dots, p_N\}, \quad (2)$$

характеризующихся нормированной информационной матрицей

$$M[\xi_N] = \sum_{i=1}^N p_i \mu(y_i).$$

Здесь  $y_i$  – опорные точки;  $p_i$  – весовые коэффициенты;  $\mu(y_i)$  – прирост информационной матрицы, обусловленный поведением одного наблюдения в точке  $y_i$ .

Согласно [20], план эксперимента (2) считается оптимальным, если опорные точки принадлежат граничной области  $\mu(Y)$ , где  $Y$  – множество (область действия). В приложении к рассматриваемой задаче граничная область  $\mu(Y)$  будет определяться кинематическими параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ , которые являются аргументами функции  $J_B(\alpha, \beta)$ , характеризующей величину кажущегося ускорения (то есть измеренное значение метрологического эталона).

Точность оценок МНК определяется посредством матрицы ковариаций  $K^*$ :

$$K^* = \sigma_j^2 (H^T H)^{-1}.$$

Здесь  $\sigma_j$  – среднеквадратические отклонения (СКО) случайной составляющей измерений (считается, что значения СКО для всех ИП одинаковы).

Нормируем матрицу ковариаций  $K^*$ :

$$K = \frac{K^*}{\sigma_j^2},$$

$$K = (H^T H)^{-1}.$$

Элементы, расположенные по главной диагонали матрицы  $K$ , характеризуют нормированные дисперсии оценок составляющих вектора  $\bar{X}$ . В рамках решаемой задачи нормированные СКО однородных составляющих вектора  $\bar{X}$ , необходимые для сравнения синтезируемых программ калибровки, будут определяются следующим образом:

$$\sigma_{\Delta} = \max_{r=1,2,3} \sqrt{K(r,r)},$$

$$\sigma_{\delta k} = \max_{r=4,5,6} \sqrt{K(r,r)},$$

$$\sigma_{\gamma} = \max_{r=7,8,9} \sqrt{K(r,r)}.$$

Здесь  $r$  – порядковый номер элемента, расположенного по главной диагонали матрицы  $K$ ;  $\sigma_{\Delta}$  – нормированные СКО смещений нулей;  $\sigma_{\delta k}$  – нормированные СКО погрешностей масштабных коэффициентов;  $\sigma_{\gamma}$  – нормированные СКО углов неортогональности осей чувствительности.

### Синтез программ калибровки блока акселерометров БИНС в классе одноосных поворотов

При осуществлении фиксированных поворотов в соответствии с рис. 1 значение одного из углов  $\alpha, \beta$  будет изменяться, в то время как значение другого угла будет постоянным. В частности, при выполнении первой группы поворотов ( $\alpha = var, \beta = 0$ ) модель инвариантной калибровки блока акселерометров может быть представлена в виде следующего ортогонального тригонометрического ряда:

$$\bar{J}_5 = H_5 \bar{X}_5,$$

$$H_5 = (1 \quad \cos(\alpha(t)) \quad \sin(\alpha(t)) \quad \cos(2\alpha(t)) \quad \sin(2\alpha(t))),$$

$$\bar{X}_5 = (a_0 \quad a_1 \quad b_1 \quad a_2 \quad b_2)^T,$$

$$a_0 = \frac{\delta k_x + \delta k_z}{2}, \quad a_1 = \Delta_y, \quad b_1 = \Delta_z, \quad a_2 = \frac{\delta k_y - \delta k_z}{2}, \quad b_2 = \frac{\gamma_{zy}}{2}.$$

Здесь  $\bar{J}_5$  – нормированная композиция измерений БА, соответствующая вертикальной оси географической системы координат;  $H_5$  – матрица измерений,

соответствующая первой группе поворотов;  $l = \overline{1, N}$  – порядковый номер текущего ИП для каждой из групп поворотов;  $N$  – количество ИП для каждой из групп поворотов;  $\bar{X}_5$  – вектор неизвестных коэффициентов ортогонального тригонометрического ряда;  $a_{0,1,2}, b_{1,2}$  – неизвестные коэффициенты ортогонального тригонометрического ряда.

Первый критерий синтеза программ калибровки, связанный с максимальным снижением влияния измерительного шума на точность калибровки, выполняется в случае, когда в состав синтезируемой программы калибровки входят ИП, обеспечивающие максимум определителя матрицы измерений  $H_5^T H_5$  [20, 21, 22]. В работах [13, 19] показано, что для этого необходимо обеспечить постоянство шага изменения кинематических параметров испытательного стенда вне зависимости от начального положения испытательного стенда. Следовательно, можно сформировать условия синтеза программ калибровки блока акселерометров, удовлетворяющих критерию максимального снижения измерительного шума (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Условия синтеза программ калибровки БА, удовлетворяющих критерию максимального снижения измерительного шума

Повороты	Значение угла	Значение угла
1-я группа	$\alpha(l) = \alpha_0^I + \frac{2\pi}{N}(l-1)$	$\beta(l) = 0$
2-я группа	$\alpha(l) = -\frac{\pi}{2}$	$\beta(l) = \beta_0^{II} + \frac{2\pi}{N}(l-1)$
3-я группа	$\alpha(l) = \alpha_0^{III} + \frac{2\pi}{N}(l-1)$	$\beta(l) = \frac{\pi}{2}$

Здесь  $\alpha_0^I, \alpha_0^{III}$  – начальное значение угла поворота испытательного стенда вокруг внешней оси для первой и третьей групп поворотов соответственно;  $\beta_0^{II}$  – начальное значение угла поворота вокруг внутренней оси для второй группы поворотов.

Зависимость точностных критериев  $\sigma_{\Delta, \delta k, \gamma}$  от количества ИП программы калибровки представлена на рис. 2, где черными маркерами обозначены значения критериев точности, рассчитанные для программы из 18 ИП [7].

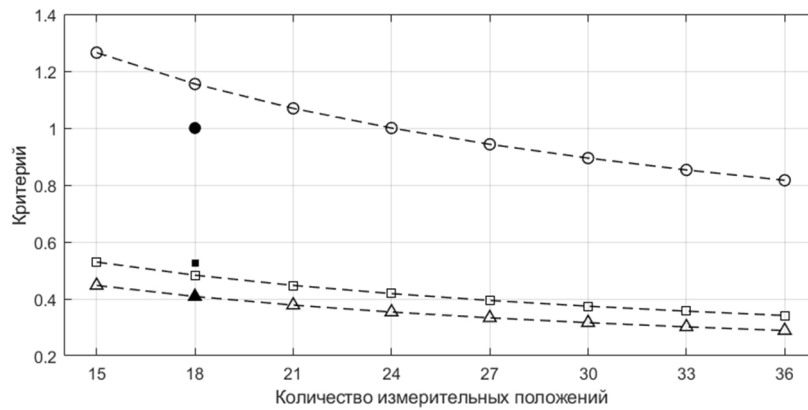


Рис. 2. Зависимость СКО составляющих вектора  $\hat{X}$  от количества ИП ( $\sigma_{\Delta}$  –  $\blacktriangle$ ,  $\sigma_{\delta k}$  –  $\blacksquare$ ,  $\sigma_{\gamma}$  –  $\bigcirc$ )

Из рис. 2 видно, что с увеличением количества ИП повышается точность определения оценок составляющих вектора инструментальных погрешностей  $\bar{X}$ . При этом эффект повышения точности, обусловленный увеличением числа ИП, каждый раз снижается, поэтому решение о выборе количества ИП должно формироваться на основе конкретных требований к процессу калибровки, а именно ограничений по общей длительности калибровки и предельной ошибке определения составляющих вектора инструментальных погрешностей  $\bar{X}$ . Таким образом, при окончательном выборе программы калибровки необходимо соблюсти разумный компромисс между точностью и длительностью.

Для снижения трудозатрат на осуществление калибровки необходимо определить условие выбора рационального количества ИП в составе синтезируемой программы калибровки. Так как каждой группе поворотов будут соответствовать пять неизвестных коэффициентов ортогонального тригонометрического ряда, то минимальное количество ИП, необходимое для определения искомых коэффициентов, составляет 15 ( $N=5$ ), что соответствует минимальному значению критерия трудозатрат на осуществление процедуры калибровки. Однако программа калибровки из 15 ИП не имеет в своем составе всех ИП, в которых ось чувствительности каждого из акселерометров ориентируется в прямом и противоположном направлениях относительно вектора  $\bar{J}_B$ . Данное условие выполняется только для программ калибровки с четным  $N$ . В связи с этим может быть синтезирована программа калибровки при  $N=6$  (с учетом ненулевых начальных значений углов испытательного стенда  $\alpha_0^I, \beta_0^{II}, \alpha_0^{III}$ ). Предполагая, что блок акселерометров установлен на испытательном стенде в соответствии со схемой на рис. 1, синтезируем программу калибровки при  $N=6$  из 18 ИП (рис. 3).

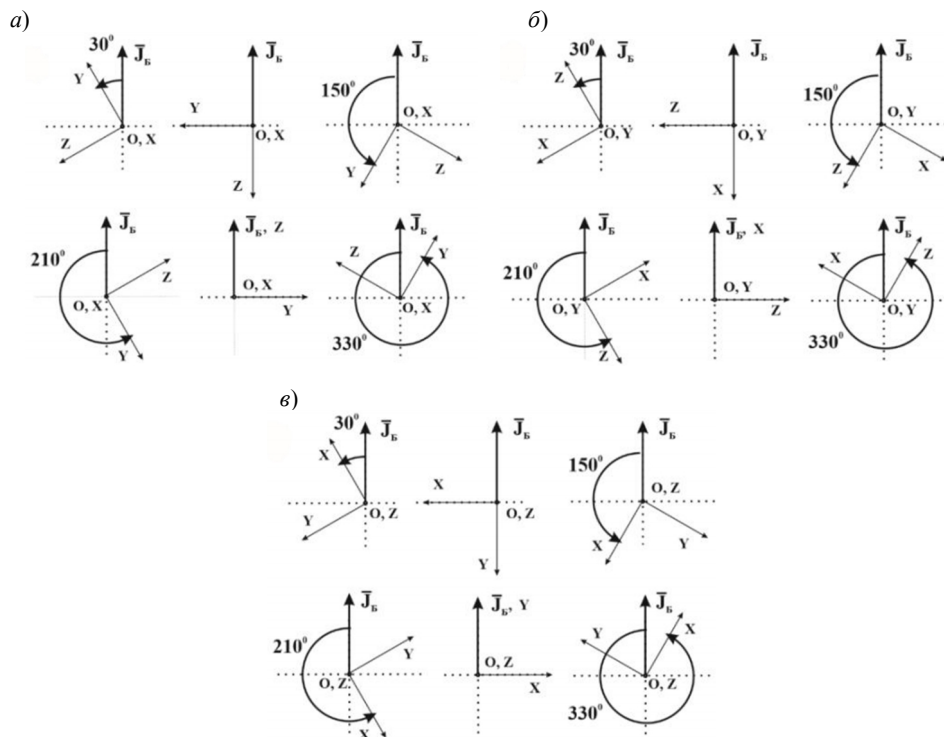


Рис. 3. Схема ориентации осей чувствительности акселерометров в программе калибровки из 18 ИП: а – первая группа поворотов; б – вторая группа поворотов; в – третья группа поворотов

Значения углов испытательного стенда, соответствующие программе калибровки из 18 ИП, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Программа калибровки из 18 ИП

№	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	№	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$
1	30	0	10	-90	-150
2	90	0	11	-90	-90
3	150	0	12	-90	-30
4	-150	0	13	120	90
5	-90	0	14	180	90
6	-30	0	15	-120	90
7	-90	30	16	-60	90
8	-90	90	17	0	90
9	-90	150	18	60	90

Из рис. 2 видно, что при уменьшении количества ИП в 1,33 раза (с 24 до 18) нормированные СКО погрешности определения составляющих вектора инструментальных погрешностей  $\bar{X}$  увеличиваются не более чем на 1,16 раз. Это позволяет сделать вывод, что программа из 18 ИП предпочтительнее, чем программа из 24.

Сравнение с программой из 18 ИП, представленной в [7], показывает, что оценки смещений нулей имеют одинаковую погрешность, а точности оценок  $\delta k$  и  $\gamma$  отличаются. Для синтезированной программы погрешность оценки  $\delta k$  меньше в 1,246 раза, а погрешность оценки  $\gamma$  больше в 1,155 раза. Сопоставление с другими программами калибровки приведено в работе [23].

Приведенное сравнение программ калибровки из класса одноосных поворотов позволяет сделать вывод, что целесообразно сделать выбор в пользу программы из 18 ИП, так как она обеспечивает минимум трудозатрат на осуществление калибровки при использовании максимально доступного диапазона измерений (обеспечение ИП, в которых ось чувствительности каждого из испытуемых приборов ориентируется по и против направления измеряемого вектора  $\bar{J}_B$ ).

## Выводы

В рамках инвариантного подхода проведен анализ точности, обеспечиваемой программами калибровки БА БИНС из класса одноосных поворотов (программы калибровки содержат три группы ИП, в каждой из которых переход в следующее положение программы осуществляется посредством поворота вокруг одной из осей стенда, лежащей в плоскости горизонта). Получен ряд симметричных программ калибровки, содержащих  $3N$  ( $N > 5$ ) ИП.

Проведенный сравнительный анализ показал, что из рассматриваемых программ целесообразно выбрать программу из 18 ИП, которая приводит по сравнению с широко используемой программой из 24 ИП к в 1,33 раза меньшим трудозатрам, обладает тем же диапазоном измеряемой величины и снижением точности получаемых оценок всего в 1,16 раза.



ЛИТЕРАТУРА

1. Titterton, D. H., Weston, J. L., *Strapdown inertial navigation technology*, 2<sup>nd</sup> edition, AIAA, 2004, pp. 255–259.
2. Измайлов Е.И. и др. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Материалы XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2008. С. 145–155.
3. Тарановский Д.О. Стендовая калибровка блока маятниковых поплавковых акселерометров корабельной инерциальной навигационной системы // Гироскопия и навигация. 2008. № 4 (63). С. 65.
4. Аврутов В.В., Головач С.В., Мазепа Т.Ю. О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. СПб., 2012. С. 113–118.
5. Вахлаков А.Ю. и др. Лазерная БИНС для ракеты-носителя «Циклон-4» // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2012. С. 68–77.
6. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. М.: Издательство Московского университета, 2008. 151 с.
7. Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Гарантирующий подход и  $l_1$ -аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Издательство Московского университета. 2012. 296 с.
8. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Уравнения процесса инвариантной калибровки акселерометров БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №8. С. 3–12.
9. Егоров Ю.Г., Попов Е.А. Исследование минимально избыточных программ калибровки триады акселерометров // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №6. С. 3–8.
10. Егоров Ю.Г., Попов Е.А. Выбор измерительных положений в программах калибровки триады акселерометров БИНС // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2016. №2. С. 55–60.
11. Голован А.А. и др. Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // Материалы XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2017. С. 225–228.
12. Егоров Ю.Г. и др. Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2018. №2. С. 3–17.
13. Егоров Ю.Г., Мьинг Хтун Наинг. Синтез программы калибровки блока акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2014. №4. 15 с.
14. Болотин Ю.В., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Итерационная схема калибровки блока акселерометров при помощи гарантирующего подхода // Механика твердого тела. 2008. №3. С. 48–61.
15. Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В. О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Аллана // Материалы XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2015. С. 485–491.
16. Кутовой Д.А. и др. Оценка основных характеристик бесплатформенного инерциального блока с использованием вариации Аллана // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. №1 (43). С. 201–209.
17. Кутовой Д.А., Ситников П.В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб, 2013. С. 246–252.
18. Allan, D.W., Statistics of atomic frequency standards, *Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, no. 2.
19. Способ калибровки гироскопов: а.с. 2280840 РФ / Ю.Г. Егоров, Д.В. Иванов; заявл. 2004131154/28; опубл. 27.07.2006. Бюлл. № 21.
20. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983. 392 с.
21. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. СПб., 2009.
22. ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания».
23. Егоров Ю.Г., Попов Е.А. Выбор измерительных положений в задаче калибровки блока акселерометров ИНС // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб., 2018. С. 8–16.

**Egorov, Yu.G.** (Bauman Moscow State Technical University), **Dzuev, A.A.** (JSC Inertial Technologies of Technocomplex (ITT), Ramenskoe), and **Popov, E.A.** (Central Scientific Research Institute of Automatics and Hydraulics (JSC TSNIAG))  
 Synthesis of Calibration Programs for an Accelerometer Unit of Strapdown INS: An Invariant Approach, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 1 (104), pp. 61–71.

**Abstract.** The paper considers the synthesis of accuracy characteristics of the calibration programs for an accelerometer unit of strapdown inertial navigation systems (INS). The study is carried out in the framework of an invariant approach. The synthesis criteria and additional requirements that the calibration programs must meet are formulated. A comparative analysis of accuracy characteristics of different calibration programs has been performed.

**Key words:** accelerometer, accelerometer unit, calibration, calibration program, measurement position.

#### REFERENCES

1. **Titterton, D. H. and Weston, J. L.**, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2<sup>nd</sup> edition, AIAA, 2004, pp. 255–259.
2. **Izmailov, E.I. et al.** Scalar method of calibration and balancing of strapdown inertial navigation systems, *15th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2008, pp. 145–155.
3. **Taranovskii, D.O.**, Test bench calibration of a floated pendulum accelerometer unit of a shipborne inertial navigation system, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2008, no. 4, p. 65.
4. **Avrutov, V.V., Golovach, S.V., and Mazepa, T.Yu.**, Scalar calibration of an inertial measurement unit, *19th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2012, pp. 113–118.
5. **Vakhlov, A.Yu. et al.**, A laser strapdown INS for the Cyclone-4 launch vehicle, *19th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2012, pp. 68–77.
6. **Golovan, A.A. and Parusnikov, N.A.**, *Matematicheskie osnovy navigatsionnykh sistem. Chast' 2. Prilozheniya metodov optimal'nogo otsenivaniya k zadacham navigatsii* (Mathematical Foundations of Navigation Systems. Part 2. Applications of Optimal Estimation Methods to Navigation Problems). Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2008.
7. **Akimov, P.A., Derevyankin, A.V., and Matasov, A.I.**, *Garantiruyushchii podkhod i  $l_1$ -approximatsiya v zadachakh otsenivaniya parametrov BINS pri stendovykh ispytaniyakh* (Guaranteed approach and  $l_1$ -approximation in the problems of estimating the parameters of a strapdown INS during bench tests), Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2012.
8. **Egorov, Yu.G. and Dzuev, A.A.**, Equations for the process of invariant calibration of SINS accelerometers, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2016, no. 8, pp. 3–12.
9. **Egorov, Yu.G. and Popov, E.A.**, Research of minimum redundant programs for calibration of an accelerometer triad, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2016, no. 6, pp. 3–8.
10. **Egorov, Yu.G. and Popov, E.A.**, Choosing measurement positions in the programs for calibration of a strapdown INS accelerometer triad, *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2016, no. 2, pp. 55–60.
11. **Golovan A.A. et al.** Calibration of inertial measurement units with evaluation of temperature dependencies by experiment with variable temperature: Results of BINS-RT calibration, *24th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2017, pp. 225–228.
12. **Egorov, Yu.G. et al.**, Iterative procedure for calibration of strapdown INS sensitive elements *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2018, no. 2, pp. 3–17.
13. **Egorov, Yu.G. and Myint Htun Naing**, Synthesis of a program for calibration of an accelerometer unit of a strapdown inertial navigation system, *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2014, no. 4, p. 15.
14. **Bolotin, Yu.V., Derevyankin, A.V., and Matasov, A.I.**, An iterative calibration scheme of an accelerometer unit using a guaranteed approach, *Mekhanika tverdogo tela*, 2008, no. 3, pp. 48–61.
15. **Stepanov, O.A., Chelpanov, I.B., and Motorin, A.V.**, Accuracy of estimating the constant error component of sensors and its relation to the Allan variance, *22nd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2015, pp. 485–491.

16. **Kutovoi, D.A. et al.**, Estimation of the main characteristics of a strapdown inertial unit using Allan variance, *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, no. 1 (43), pp. 201–209.
17. **Kutovoi, D.A. and Sitnikov, P.V.**, Some practical issues of using Allan variance in the study of a strapdown inertial unit, *15 konferentsiya molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravlenie dvizheniem"* (15th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control), St. Petersburg, 2013, pp. 246–252.
18. **Allan, D.W.**, Statistics of atomic frequency standards, *Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, no. 2.
19. **A method for gyro calibration**: Author's Certificate 2280840 RF, Yu.G. Egorov, D.V. Ivanov; decl. 2004131154/28; publ. 27.07.2006, bull. no. 21.
20. *Mathematical theory of experiment planning*, Ermakov S.M., Ed., Moscow: Nauka, 1983.
21. **Stepanov, O.A.**, *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii* (Fundamentals of the Estimation Theory with Applications to the Problems of Navigation Information Processing), Part 1, *Vvedenie v teoriyu otsenivaniya* (Introduction to the Estimation Theory), St. Petersburg: TsNII Elektropribor, 2017.
22. **GOST 24026-80** Development tests.
23. **Egorov, Yu.G. and Popov, E.A.**, Choosing measurement positions in calibration of the INS accelerometer unit, *Materialy 31 konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora girkopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* (Proc. 31st Conf. in Memory of N.N. Ostryakov), St. Petersburg: Elektropribor, 2018, pp. 8–16.

Материал поступил 22.08.2018