

# КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ НА ГРУБЫХ СТЕНДАХ С ОЦЕНКОЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ С ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ \*

А.В. Козлов<sup>1</sup>, И.Е. Тарыгин<sup>2</sup>, А.А. Голован<sup>3</sup>  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Лаборатория управления и навигации,  
Москва, Россия, e-mail: a.kozlov.msu@gmail.com

## Аннотация

**Ключевые слова:** инерциальный измерительный блок, инерциальные датчики, калибровка, температурные зависимости, оптимальное оценивание, фильтр Калмана

*Работа посвящена развитию практического метода калибровки инерциальных измерительных блоков (ИИБ) на одноосном поворотном стенде с горизонтальной осью вращения. В этом методе оцениваемыми калибровочными параметрами являются стандартные характеристики инерциальных датчиков: смещения нулевых сигналов, погрешности их масштабных коэффициентов, перекосы осей чувствительности, коэффициенты динамического дрейфа и, при необходимости, других параметров. При этом информация от поворотного стенда (об угловой скорости вращения, об углах поворота и пр.) не является необходимой. Это позволяет в одном простом калибровочном эксперименте, не требующем точного соблюдения какого-либо специального плана получать оценки всех необходимых параметров.*

*Цель настоящей работы – модификация используемых математических моделей с целью учета и определения параметров температурных зависимостей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков в эксперименте с переменной температурой. Особый интерес представляет возможность исключения из плана эксперимента этапа стабилизации температурного режима. Как и к вращениям поворотного стенда, к изменению температуры внутри ИИБ не предъявляется строгих требований.*

## Калибровка как задача оптимального оценивания

Набор оцениваемых параметров инструментальных погрешностей датчиков включает в себя: смещения нулевых сигналов ньютонометров и датчиков угловой скорости (ДУС), погрешности их масштабных коэффициентов, перекосы осей чувствительности, и, для некоторых типов ДУС, коэффициенты динамического дрейфа. В работе используются обозначения, принятые в [1-3].

В [1, 2] задача определения параметров модели инструментальных погрешностей ставится как задача оптимального оценивания калмановского типа, которая может быть решена методами калмановской фильтрации. Модель инструментальных погрешностей ньютонометров имеет вид:

$$f'_z - f_z = \Delta f_z^0 + \Gamma f_z + \Delta f_z^s, \quad f'_z = \begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix}, \quad f_z = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{bmatrix},$$

где  $f'_z$  – вектор-столбец показаний ньютонометров,  $f_z$  – вектор истинной удельной силы, действующей на приведенную чувствительную массу ньютонометров, записанный в проекциях на оси приборной системы координат  $Mz$ ,  $\Delta f_z^0$  – столбец смещений нулевых сигналов,  $\Gamma$  – матрица, содержащая погрешности масштабных коэффициентов на диагонали и малые углы перекосов осей чувствительности вне диагонали. Приборная система координат выбрана так, что элементы матрицы  $\Gamma$  над главной диагональю равны нулю. Модель инструментальных погрешностей датчиков угловой скорости (ДУС) имеет вид:

$$\omega'_z - \omega_z = -v_z^0 - \Theta \omega_z - D \frac{f_z}{g_e} - v_z^s,$$

$$\omega'_z = \begin{bmatrix} \omega'_1 \\ \omega'_2 \\ \omega'_3 \end{bmatrix}, \quad \omega_z = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}.$$

<sup>1</sup> Кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.

<sup>2</sup> Аспирант.

<sup>3</sup> Доктор физ.-мат. наук.

Здесь  $\omega_z'$  – вектор-столбец показаний ДУС,  $\omega_z$  – вектор абсолютной угловой скорости ИИБ в проекциях на оси приборной системы координат,  $v_z^0$  – столбец дрейфов ДУС,  $\Theta$  – матрица, содержащая малые погрешности масштабных коэффициентов на диагонали и малые углы перекосов осей чувствительности вне диагонали,  $D$  – матрица малых коэффициентов динамического дрейфа, возникающего у некоторых типов ДУС (например, микроэлектромеханических),  $g_e$  – некоторое опорное значение удельной силы (например, ускорение свободного падения на экваторе),  $\Delta f_z^s$  – стохастическая составляющая.

Далее решается задача определения по показаниям ДУС модельной матрицы  $L_y$  ориентации приборной системы координат относительно опорной [4]. Одновременно вводятся уравнения ошибок с вектором состояния, содержащим параметры инструментальных погрешностей  $\Delta f_z^0$ ,  $\Gamma$ ,  $v_z^0$ ,  $\Theta$ ,  $D$  и угловые ошибки  $\beta_x$  определения ориентации приборной системы координат. В обозначениях, принятых в [1]–[3], изменение компонент вектора состояния в линейном приближении описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_x &= \hat{u}_x \beta_x + L_y^T \left( v_z^0 + \Theta \omega_z + D \frac{f_z}{g_e} \right) + L_y^T v_z^s \quad \beta_x(0) = \beta_0, \\ \dot{v}_z^0 &= 0, \quad \dot{\Theta} = 0, \quad \dot{D} = 0, \quad \dot{\Delta f_z^0} = 0, \quad \dot{\Gamma} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Корректирующие измерения формируются как разность вычисленного (модельного) и измеренного вектора удельной силы в проекциях на опорный (географический) трехгранник. В соответствии с принятыми моделями сформированные указанным образом корректирующие измерения линейно связаны с компонентами вектора состояния введённой выше динамической системы:

$$z^{acc} = \hat{\beta}_x \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \end{bmatrix}^T + L_y^T (\Delta f_z^0 + \Gamma f_z) + L_y^T \Delta f_z^s. \quad (2)$$

Задача оценки вектора состояния системы (1) при помощи измерений (2) решается известными методами линейного оптимального оценивания. Коэффициенты в уравнениях (1) и (2) при параметрах, подлежащих оценке, зависят от движения ИИБ в калибровочном эксперименте. Для наилучшей наблюдаемости процедура калибровки включает в себя три цикла, в которых ИИБ последовательно устанавливается в трех различных положениях (каждая из приборных осей с точностью до погрешностей установки совмещается с горизонтальной осью вращения стенда) [1], [2].

В приведенных уравнениях предполагается, что температурная зависимость перечисленных выше параметров инструментальных погрешностей отсутствует. Традиционным подходом в такой ситуации в настоящее время является проведение калибровочных экспериментов при различных температурах, в нескольких т.н. «температурных точках». В течение каждого эксперимента температура внутри ИИБ предполагается постоянной. Далее, при наличии оценки параметров в нескольких температурных точках, температурные зависимости этих параметров аппроксимируются кусочно-линейной интерполяцией или гладкими кривыми (например, кубическими).

Установление температурного режима как в термокамере, так и внутри ИИБ, приводит к задержке до нескольких часов в проведении эксперимента. Кроме того, температурные точки должны полностью перекрывать весь диапазон рабочих температур прибора. Например, для диапазона от  $-60$  до  $+60$  градусов Цельсия количество температурных точек может достигать двенадцати ( $-60, -45, -30, -15, -10, -5, +5, +10, +15, +30, +45, +60$ ).

### Калибровка с учётом температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков

Для учёта температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков модифицируем модель погрешностей. Введём показания термодатчиков  $T_{f1}, T_{f2}, T_{f3}, T_{\omega1}, T_{\omega2}, T_{\omega3}$ , измеряющих температуры трёх ньютометров и трёх датчиков угловой скорости соответственно, и составим из них матрицы:

$$T_f = \begin{bmatrix} T_{f1} & 0 & 0 \\ 0 & T_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & T_{f3} \end{bmatrix}, \quad T_\omega = \begin{bmatrix} T_{\omega1} & 0 & 0 \\ 0 & T_{\omega2} & 0 \\ 0 & 0 & T_{\omega3} \end{bmatrix}.$$

Сделаем также следующие предположения:

- температура измеряется с необходимой точностью, требуемой для компенсации температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков;
- температура датчиков при проведении эксперимента изменяется в диапазоне, в котором температурные зависимости датчиков близки к линейным;
- температурные изменения перекосов осей чувствительности и динамических дрейфов (при их наличии) за время эксперимента пренебрежимо малы.

В этих предположениях изменим модель погрешностей ньютонометров и датчиков угловой скорости, введя линейные зависимости нулевых сигналов и погрешностей масштабных коэффициентов от температуры.

$$f'_z - f_z = \Delta f_z^0 + T_f k_{\Delta f} + \Gamma f_z + T_f K_{\Gamma} f_z + \Delta f_z^s, \quad k_{\Delta f} = \begin{bmatrix} k_{\Delta f1} \\ k_{\Delta f2} \\ k_{\Delta f3} \end{bmatrix}, \quad K_{\Gamma} = \begin{bmatrix} K_{\Gamma11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\Gamma22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Gamma33} \end{bmatrix},$$

$$\omega'_z - \omega_z = -v_z^0 - T_{\omega} k_v - \Theta \omega_z - T_{\omega} K_{\Theta} \omega_z - D \frac{f_z}{g_e} - v_z^s, \quad k_v = \begin{bmatrix} k_{v1} \\ k_{v2} \\ k_{v3} \end{bmatrix}, \quad K_{\Theta} = \begin{bmatrix} K_{\Theta11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\Theta22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Theta33} \end{bmatrix}.$$

В вектор состояния системы добавим подлежащие определению компоненты столбцов температурных коэффициентов нулевых сигналов ньютонометров  $k_{\Delta f}$  и датчиков угловой скорости  $k_v$ , а также ненулевые компоненты матриц  $K_{\Gamma}$  и  $K_{\Theta}$ . Вместо уравнений (1) теперь имеем

$$\dot{\beta}_x = \hat{u}_x \beta_x + L_y^T \left( v_z^0 + T_{\omega} k_v + \Theta \omega_z + T_{\omega} K_{\Theta} \omega_z + D \frac{f_z}{g_e} \right) + L_y^T v_z^s \quad \beta_x(0) = \beta_0, \quad (3)$$

$$\dot{v}_z^0 = \Delta \dot{f}_z^0 = \dot{k}_{\Delta f} = \dot{k}_v = 0, \quad \dot{\Theta} = \dot{D} = \dot{\Gamma} = \dot{K}_{\Theta} = \dot{K}_{\Gamma} = 0.$$

Модель измерений также меняется:

$$z^{acc} = \hat{\beta}_x \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \end{bmatrix}^T + L_y^T (\Delta f_z^0 + T_f k_{\Delta f} + \Gamma f_z + T_f K_{\Gamma} f_z) + L_y^T \Delta f_z^s \quad (4)$$

Для оценки неизвестных параметров, как и прежде [2], будем использовать оптимальный фильтр Калмана. В новой расширенной модели задачи калибровки (3), (4) коэффициенты при искомым параметрах зависят как от движения системы, так и от изменения температуры инерциальных датчиков. Наблюдаемость температурных коэффициентов обеспечивается достаточным (в несколько градусов) изменением температуры, которое не должно зависеть от механического движения. В реальных экспериментах это легко обеспечить. Например, изменение температуры может быть линейным, пилообразным, или асимптотическим при собственном разогреве ИИБ. Угловая скорость и проекции удельной силы на оси чувствительности ньютонометров при этом будут изменяться независимо от температуры по другим законам, что и обеспечит разделение оценок.

Поскольку изменение температуры внутри ИИБ становится не недопустимым, как ранее, а наоборот, полезным, можно исключить из плана эксперимента стабилизацию температурного режима, а значит сократить время каждого эксперимента. Кроме того, определение коэффициентов температурной зависимости (а не только значений смещений нулей и погрешностей масштабных коэффициентов, как ранее) в крайних температурных точках позволит экстраполировать зависимости за пределы температурного интервала, в котором проведены эксперименты. То есть, при фиксированном рабочем диапазоне температур требуемое количество экспериментов станет меньше.

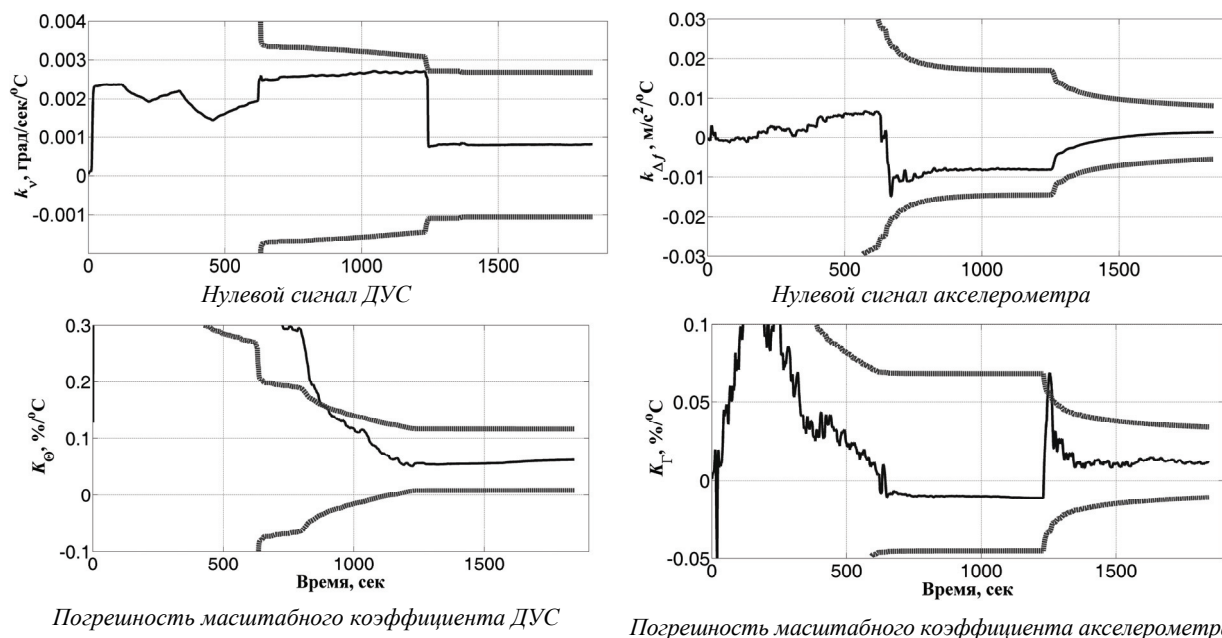
## Результаты

Для проверки новых моделей инструментальных погрешностей с учетом температурных зависимостей были обработаны данные калибровочного эксперимента для инерциального измерительного блока, построенного на базе микромеханических гироскопов и ньютонометров. Данный блок разработан одним из российских предприятий и имеет следующие характеристики инерциальных датчиков:

- стабильность нулевого сигнала ДУС 0.03 град/с, ньютонометров –  $5 \times 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>;
- спектральная плотность шума ДУС 0.05 град/с/ $\sqrt{\Gamma}$ ц, ньютонометров –  $2 \times 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>/ $\sqrt{\Gamma}$ ц.

Эксперимент, как описано выше, включал три цикла вращения вокруг горизонтальной оси поворотного стенда. Угловая скорость вращений – приблизительно  $10 \pm 1$  град/с. Эксперимент проведён при комнатной температуре с инерциальным блоком в состоянии саморазогрева. Температура датчиков изменялась примерно на  $2.5^\circ\text{C}$  в каждом из циклов, кроме третьего, в котором изменение составило приблизительно  $1^\circ\text{C}$ .

При обработке записей одновременно с прежним набором параметров модели погрешностей инерциальных датчиков оценивались также коэффициенты температурных зависимостей нулевых сигналов и погрешностей масштабных коэффициентов. Результаты оценки приведены на рисунке.



Динамика оценки параметров температурной зависимости для одной пары датчиков (темными линиями дана динамика оценки, светлыми – оценка 3-σ границы)

Из приведённых графиков следует, что наблюдаемость указанных параметров в эксперименте имеется. Последующая компенсация погрешностей датчиков показывает, что полученные оценки близки к реальным значениям коэффициентов температурной зависимости.

## Выводы

В методе калибровки инерциальных измерительных блоков на грубом одностепенном стенде рассмотрена возможность оценки коэффициентов температурной зависимости нулевых сигналов и масштабных коэффициентов инерциальных датчиков в эксперименте с переменной температурой. Температурные коэффициенты оцениваются одновременно со всеми остальными параметрами модели погрешностей инерциальных датчиков. Новые алгоритмы калибровки проверены при обработке реальных данных.

## Литература

1. **Н.Б. Вавилова, Н.А. Парусников, И.Ю. Сазонов.** Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов // *Современные проблемы математики и механики*, Том I. – М.: МГУ, 2009. — С. 212–222
2. **А.В. Козлов, И.Ю. Сазонов, Н.Б. Вавилова, Н.А. Парусников.** Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учётом разнесения чувствительных масс ньютонометров // *XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам*. — ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт-Петербург, 2013. — С. 104–107
3. **А.А. Голован, Н.А. Парусников.** Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. – М.: МГУ, 2008. – 151 с.
4. **P.G. Savage.** Strapdown inertial navigation integration algorithm design. Part 1: attitude algorithms // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, No. 1, 1998, pp. 19–28.