

КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ НА ГРУБЫХ ОДНООСНЫХ СТЕНДАХ: ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОИЗВОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ*

А. В. Козлов¹, И. Е. Тарыгин², А. А. Голован³

МГУ им. М.В. Ломоносова, Лаборатория управления и навигации,
Москва, Россия, e-mail: i.tarygin@gmail.com

Аннотация

Ключевые слова: инерциальные датчики, калибровка, температурные зависимости, оптимальное оценивание, фильтр Калмана

Цель настоящей работы – модификация разработанного ранее метода калибровки блока инерциальных датчиков с целью учета и определения параметров зависимостей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков от производной температуры по времени. Метод предназначен для калибровки инерциальных измерительных блоков на поворотных стендах с горизонтальной осью вращения. Оцениваемыми параметрами являются стандартные характеристики модели погрешностей инерциальных датчиков: смещения нулевых сигналов, погрешности их масштабных коэффициентов, перекосы осей чувствительности, коэффициенты динамического дрейфа и, при необходимости, другие параметры. При этом благодаря тому, что движение блока ограничено (только вращение), информация от инерциальных датчиков является избыточной. За счёт этого оказывается возможной оценка параметров инструментальных погрешностей инерциальных датчиков без привлечения информации от стенда и без соблюдения какого-либо точного плана эксперимента.

Традиционные методы определения температурных зависимостей подразумевают проведение отдельных экспериментов. В работе рассмотрена возможность определения коэффициентов температурной зависимости совместно с остальными параметрами в одном эксперименте. При помощи моделирования ковариаций ошибки оценки исследования наблюдаемость новых параметров в двух температурных режимах калибровочного эксперимента – при саморазогреве инерциального блока (по реальной записи показаний термодатчиков инерциального блока) и при контролируемом изменении температуры в термокамере, близком к линейному.

Введение

Задача калибровки предполагает определение параметров модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков по результатам обработки показаний датчиков во время калибровочного эксперимента. Наличие оценок этих параметров позволяет впоследствии компенсировать систематические составляющие погрешностей датчиков в режимах начальной выставки и навигации. Традиционные модели инструментальных погрешностей обычно включают: смещения нулевых сигналов ньютонометров и датчиков угловой скорости (ДУС), погрешности масштабных коэффициентов, малые углы несоосности осей чувствительности, и, для некоторых типов ДУС, коэффициенты динамического дрейфа. Известен метод калибровки, позволяющий получить оценки указанных параметров для инерциального измерительного блока в сборе (т.е. одновременно для ньютонометров и ДУС) путём обработки показаний датчиков в эксперименте на поворотном стенде с горизонтальной осью вращения, не требующем ни точного соблюдения плана эксперимента, ни соблюдения или измерения стендом углов поворота осей и угловых скоростей вращения [1–3]. Также было показано, что в число определяемых по результатам калибровки параметров могут быть включены отнесения инерциального блока от оси вращения стенда (что позволяет исключить требование его близкого расположения к оси вращения, и, например, проводить калибровку нескольких блоков одновременно на одном стенде) [2], а также коэффициенты температурной зависимости смещений нулевых сигналов инерциальных датчиков и погрешностей их масштабных коэффициентов (в эксперименте с переменной температурой) [3].

Вместе с тем известно, что смещения нулевого сигнала (дрейфы) некоторых ДУС, например волоконно-оптических, зависят не только от температуры, но и от скорости изменения температуры, т.е. от производной температуры по времени [4–5]. В соответствии с литературой данная зависимость близка к линейной и одинакова во всём температурном диапазоне. Настоящая работа посвящена исследованию возможности определения коэффициентов зависимости дрейфов ДУС от производной температуры по времени в калибровочных экспериментах с переменной температурой, с минимальными изменениями в плане эксперимента и требований к нему. Далее будут рассмотрены два температурных режима проведения калибровочного эксперимента – при саморазогреве системы и при контролируемом изменении температуры в термокамере.

¹ Кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.

² Аспирант.

³ Доктор физ.-мат. наук.

В работе используются обозначения, принятые в работах [1–3, 6].

Математическая модель задачи калибровки без учёта температурных зависимостей

В [1–3] задача определения параметров модели инструментальных погрешностей ставится как задача оптимального оценивания вектора состояния линейной динамической системы с измерениями, для решения которой используется фильтр Калмана. Модель инструментальных погрешностей ньютонометров имеет вид:

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

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 , Δf_z^0 – столбец смещений нулевых сигналов, Γ – матрица, содержащая погрешности масштабных коэффициентов на диагонали и малые углы перекосов осей чувствительности вне диагонали. Приборная система координат выбрана так, что элементы матрицы Γ над главной диагональю равны нулю.

Модель инструментальных погрешностей датчиков угловой скорости (ДУС) имеет аналогичный вид:

$$w'_z - w_z = -n_z^0 - \Theta w_z - n_z^s, \quad w'_z = \begin{bmatrix} w'_1 \\ w'_2 \\ w'_3 \end{bmatrix}, \quad w_z = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}, \quad n_z^0 = \begin{bmatrix} n_1^0 \\ n_2^0 \\ n_3^0 \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{bmatrix}.$$

Здесь w'_z – вектор-столбец показаний ДУС, w_z – вектор абсолютной угловой скорости БИНС в проекциях на оси приборной системы координат, n_z^0 – столбец дрейфов ДУС, Θ – матрица, содержащая малые погрешности масштабных коэффициентов на диагонали и малые углы перекосов осей чувствительности вне диагонали.

По показаниям ДУС определяется модельное значение L' матрицы L ориентации приборной системы координат относительно опорной [7]. Также вводятся уравнения ошибок для вектора состояния, содержащего параметры инструментальных погрешностей Δf_z^0 , Γ , v_z^0 , Θ и угловые ошибки β_x определения ориентации приборной системы координат. В обозначениях, принятых в [1–3, 6], изменение компонент вектора состояния в линейном приближении описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{dt} b_x = \hat{u} b_x + L^T (n_z^0 + \Theta w_z) + L^T n_z^s, \quad b_x(0) = b_{x0}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} n_z^0 = 0, \quad \frac{d}{dt} \Theta = 0, \quad \frac{d}{dt} \Delta f_z^0 = 0, \quad \frac{d}{dt} \Gamma = 0.$$

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 введенной выше динамической системы

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

Задача оценки вектора состояния системы (1) при помощи измерений (2) решается известными методами линейного оптимального оценивания. Для наилучшей наблюдаемости процедура калибровки включает в себя три цикла, в которых инерциальный блок вращается вокруг горизонтальной оси и каждая из приборных осей последовательно совмещается с осью вращения стенда (с точностью до погрешностей установки) [1–2].

В приведенных моделях не учтена температурная зависимость перечисленных выше параметров модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков. Традиционным подходом в такой ситуации в настоящее время является проведение калибровочных экспериментов в термокамере при различных температурах, в нескольких заранее выбранных так называемых «температурных точках». В течение каждого эксперимента температура инерциальных датчиков предполагается постоянной. После получения оценок 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 инерциального блока, 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 -70 до $+60^\circ\text{C}$ градусов Цельсия (для изделий общеклиматического исполнения по ГОСТ, эксплуатируемых на борту воздушных и морских судов) количество температурных точек может составлять десять и более (при шаге $10\text{--}15^\circ\text{C}$).

Калибровка с учётом температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков

Для учёта температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков модифицируем модель погрешностей. Введём в модель температуры T_{f1}, T_{f2}, T_{f3} трёх ньютометров и температуры T_{w1}, T_{w2}, T_{w3} трёх датчиков угловой скорости. Составим матрицы:

$$T_f = \begin{bmatrix} T_{f1} & 0 & 0 \\ 0 & T_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & T_{f3} \end{bmatrix}, \quad T_w = \begin{bmatrix} T_{w1} & 0 & 0 \\ 0 & T_{w2} & 0 \\ 0 & 0 & T_{w3} \end{bmatrix}.$$

Сделаем также следующие предположения:

- температура измеряется с необходимой точностью, требуемой для компенсации температурных зависимостей погрешностей инерциальных датчиков;
- температура датчиков и её производная по времени при проведении эксперимента изменяются в диапазоне, в котором температурные зависимости датчиков близки к линейным;
- пренебрежем температурными изменениями перекосов осей чувствительности за время эксперимента.

В этих предположениях изменим модель погрешностей датчиков угловой скорости, добавив линейные зависимости смещений нулевых сигналов и погрешностей масштабных коэффициентов от температуры, рассмотренные в [3], а также зависимость дрейфов ДУС от производной температуры по времени.

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

$$w'_z - w_z = -n_z^0 - T_w k_n - T_w \Lambda_n - \Theta w_z - T_w K_{\Theta} w_z - n_z^S,$$

$$k_n = \begin{bmatrix} k_{n1} \\ k_{n2} \\ k_{n3} \end{bmatrix}, \quad K_{\Theta} = \begin{bmatrix} K_{\Theta11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\Theta22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Theta33} \end{bmatrix}, \quad \Lambda_n = \begin{bmatrix} \Lambda_{n1} & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_{n2} & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_{n3} \end{bmatrix}.$$

В вектор состояния системы добавим подлежащие определению компоненты столбцов температурных коэффициентов для смещений нулевых сигналов ньютометров $k_{\Delta f}$ и датчиков угловой скорости k_n , а также ненулевые компоненты матриц K_{Γ} , K_{Θ} и Λ_n . Вместо уравнений (1) теперь имеем

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{b}_x &= \hat{\mathbf{u}}_x \mathbf{b}_x + L_y^T (\mathbf{n}_z^0 + T_w k_n + \dot{T}_w \Lambda_n + \Theta \mathbf{w}_z + T_w K_\Theta \mathbf{w}_z) + L_y^T \mathbf{n}_z^s, \quad \mathbf{b}_x(0) = \mathbf{b}_{x0}, \\ \frac{d}{dt} n_z^0 &= \frac{d}{dt} \Delta f_z^0 = \frac{d}{dt} k_{\Delta f} = \frac{d}{dt} k_n = 0, \quad \frac{d}{dt} \Theta = \frac{d}{dt} \Gamma = \frac{d}{dt} K_\Theta = \frac{d}{dt} K_\Gamma = \frac{d}{dt} \Lambda_n = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Модель измерений также меняется:

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

Для оценки вектора состояния линейной динамической системы (3) с измерениями (4), включающего искомые параметры, как и прежде [1–3], будем использовать фильтр Калмана. В новой расширенной модели задачи калибровки наблюдаемость температурных коэффициентов обеспечивается достаточным (хотя бы в несколько градусов) изменением температуры инерциальных датчиков и её производной по времени (в диапазоне от -0.02 до $+0.02$ градуса за секунду). Кроме того, чтобы оценки температурных коэффициентов и остальных параметров разделились в линейных комбинациях, входящих в модели (3) и (4), изменение во времени температуры, её производной по времени, угловой скорости вращения стенда и углов ориентации инерциального блока относительно вектора силы тяжести должны быть линейно независимыми функциями. Это легко обеспечивается в реальных экспериментах. Например, изменение температуры может быть асимптотическим при саморазогреве инерциального блока, либо пилообразным при экспериментах в термокамере. Угловая скорость вращения и проекции удельной силы на оси чувствительности ньютометров при этом будут изменяться независимо от температуры по другим законам, что и обеспечит разделение оценок в линейных комбинациях моделей (4) и (5).

Однако помимо формального наличия наблюдаемости в практических приложениях важны и количественные характеристики ошибок оценки. Такими характеристиками являются оценки стандартных отклонений ошибок оценки, получаемые как квадратные корни из соответствующих элементов ковариационной матрицы фильтра Калмана. В частности, если вращение вокруг одной из приборных осей будет происходить при незначительном изменении производной температуры по времени (например, в конце саморазогрева), ковариации ошибки оценки параметров, наблюдаемых на этом цикле вращения, будут убывать чрезвычайно медленно. Это не обеспечит приемлемой конечной точности калибровки. Ввиду высокого порядка системы (в рассмотренном варианте он составляет 39) и сложности взаимосвязей между элементами вектора состояния предсказать точность оценки аналитически не представляется возможным. Поэтому перед проведением экспериментов для выбора оптимального плана необходимо провести оценку потенциальной точности калибровки при различных температурных режимах и режимах вращения. Такую оценку можно получить путём ковариационного моделирования.

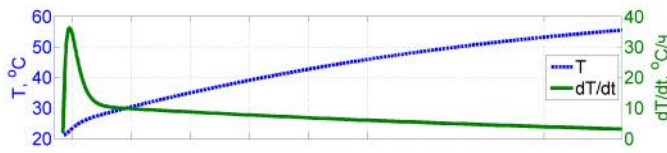
Поскольку в таких экспериментах изменение температуры внутри инерциального блока становится не недопустимым, как ранее, а наоборот, необходимым, из плана эксперимента исключается этап стабилизации температурного режима. Это значительно сокращает время каждого эксперимента. Кроме того, определение коэффициентов 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. А значит, при фиксированном рабочем диапазоне температур требуемое количество экспериментов станет меньше.

Результаты

Для проверки наблюдаемости новых параметров модели инструментальных погрешностей было проведено ковариационное моделирование для инерциального блока высокой точности в двух типах экспериментов. В первом моделировалось изменение температуры на саморазогреве по показаниям термодатчиков реального инерциального блока, включенного при нормальных условиях. Эксперимент, как описано выше, включал циклы вращения вокруг горизонтальной оси поворотного стенда в разные стороны. Угловая скорость вращений – 10 градусов в секунду.

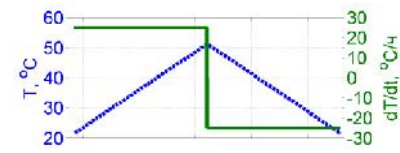
При обработке записей одновременно с прежним набором параметров модели погрешностей инерциальных датчиков оценивались также коэффициенты температурных зависимостей смещений нулевых сигналов и погрешностей масштабных коэффициентов и коэффициенты зависимости дрейфов ДУС от производной температуры по времени. Пример результатов приведён на рисунке (даны оценки только температурных параметров модели погрешностей инерциальных датчиков).

Саморазогрев

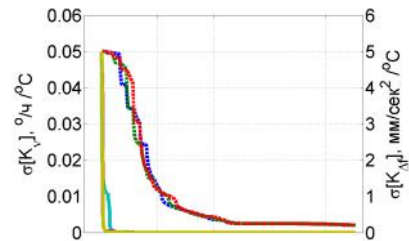
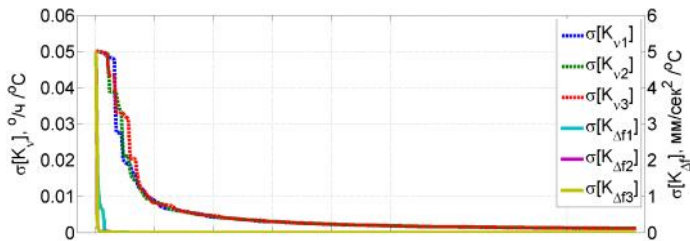
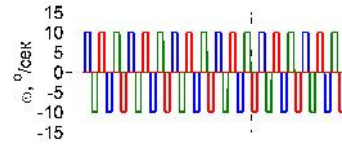
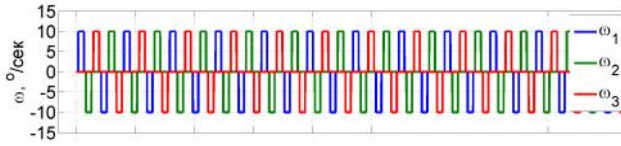


1, а. Температура и её производная

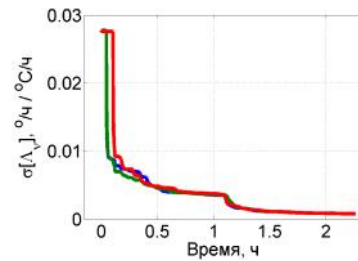
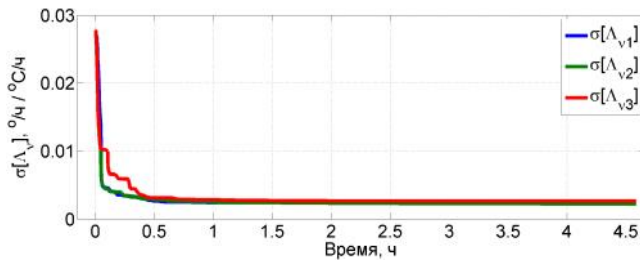
Линейное изменение температуры



1, б. Угловая скорость вращения стэнда



1, в. Оценки стандартных отклонений ошибки оценки температурных коэффициентов смещений нулевых сигналов



1, г. Оценки стандартных отклонений ошибки оценки коэффициентов зависимости дрейфов ДУС от производной температуры по времени

Ковариации ошибок оценки температурных коэффициентов в двух режимах

Из приведённых графиков следует, что наблюдаемость указанных параметров в эксперименте имеется. При этом конечные оценки точности калибровки как минимум на порядок меньше начальных (априорных).

Выводы

В работе была рассмотрена модификация метода калибровки инерциальных измерительных блоков на одноосном стэнде с горизонтальной осью вращения, предусматривающая оценку коэффициентов зависимости инструментальных погрешностей инерциальных датчиков от производной температуры по времени одновременно со всеми остальными параметрами модели погрешностей инерциальных датчиков. По результатам ковариационного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. В режиме саморазогрева необходимо обеспечить такую длительность циклов вращения, чтобы вращение вокруг всех трёх приборных осей происходило за время максимального изменения производной температуры по времени (для использованной в эксперименте инерциальной навигационной системы – порядка 10 минут). В этом случае предпочтительно использовать двух- или трёхосный стэнд для быстрой смены осей вращения.

2. При контролируемом изменении температуры в термокамере за счёт большей вариации производной температуры по времени длительность калибровочного эксперимента можно сократить приблизительно вдвое без ухудшения точности оценки.

Литература

1. **Вавилова, Н.Б., Парусников, Н.А., Сазонов, И.Ю.** Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов // Современные проблемы математики и механики. – 2009. – Т. 1. – С.212–222.
2. **Козлов, А.В., Сазонов, И.Ю., Вавилова, Н.Б., Парусников Н.А.** Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учётом разнесения чувствительных масс ньютонометров / XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2013. –С.104–107.
3. **Козлов, А.В., Тарыгин, И.Е., Голован, А.А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых стендах с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой / XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – С.319–322.
4. **Мешковский, И.К., Мирошниченко, Г.П., Рупасов, А.В., Стригалева, В.Е., Шарков, И. А.** Исследование влияния тепловых воздействий на работу волоконно-оптического датчика угловой скорости / XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. –С.191–202.
5. **Галягин, К.С., Ошивалов, М.А., Вахрамеев, Е.И., Ивонин, А.С.** Расчётный прогноз теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – №32. – С.127–140.
6. **Голован, А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 151 с.
7. **Savage, P.G.** Strapdown inertial navigation integration algorithm design. Part 1: attitude algorithms // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, – 1998. – vol. 21, No. 1. – P.19–28.