ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 531.383

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДРЕЙФОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ТРЕХОСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Головач С. В.
Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал», г. Киев, Украина
E-mail: golovach.s@meta.ua

Приведен метод комплексной алгоритмической компенсации температурных дрейфов измерительных каналов трехосного акселерометра в составе инерциального измерительного модуля. Согласно техническим характеристикам исследуемый образец должен выдерживать резкие изменения температуры окружающей среды в процессе эксплуатации, что существенно усложняет задачу компенсации температурной погрешности. Метод основан на индикации режимов воздействия температуры и определении нормированных аппроксимирующих функций для компенсации погрешности выходных сигналов трехосного акселерометра. В качестве априорных данных используются сигналы температурных датчиков, установленных в разных частях измерительного канала трехосного акселерометра и выходные сигналы чувствительных элементов маятниковых акселерометров, установленных в термостабилизированном объеме, которые были получены в процессе температурных испытаний.

***Ключевые слова**: акселерометры, измерительный канал, температурный дрейф, аппроксимация.*

Введение

Реализация методов инерциальной навигации в современных системах основана на использовании инерциальных измерительных модулей (ИИМ) [1], которые состоят из гироскопических и акселерометрических инерциальных датчиков. В качестве высокоточных измерителей кажущегося ускорения для ИИМ часто используются маятниковые акселерометры (АК). Как правило, их объединяют в отдельный конструктивный блок – трехосный акселерометр, в котором номинальное расположение осей чувствительности АК является ортогональным. Главным недостатком маятниковых АК является высокая температурная зависимость работы их чувствительных элементов, что приводит к увеличению погрешности определения положения объекта в инерциальной системе координат.

Одним из методов устранения влияния колебаний температуры внешней среды на работу чувствительных элементов АК является применение конструктивных решений, суть которых заключается в использовании систем термостатирования [2]. Однако при жестких требованиях к размерам и потребляемой мощности ИИМ, термостатируемый объем должен быть минимальным, поэтому в некоторых случаях (в частности для исследуемого ИИМ) электронный блок преобразования сигналов (БПС) трехосного АК, который входит в измерительный канал, конструктивно размещают вне кожуха термостата.

Основным элементом электронного блока преобразования сигналов акселерометров является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Как правило, диапазон рабочих температур АЦП относительно широкий: от -40 до +85°С [3]. Однако воздействие температуры внешней среды в таких устройствах вызывает возникновение погрешностей в виде смещения нуля и дрейфа коэффициента усиления [4]. На практике для решения задач температурной компенсации погрешностей измерительных каналов трехосного АК выполняют процедуру определения зависимости характеристик АЦП входящей в состав электронного блока преобразования сигналов, от воздействия температуры автономно относительно чувствительных элементов АК. С этой целью проводят дополнительные мероприятия с использованием прецизионного калибратора напряжения и термокамеры [5, 6]. Так же используется метод, при котором определяется и учитывается зависимость смещения нуля выходного сигнала одноосного АК в процессе его калибровки в термокамере [7] с помощью прецизионной оптической делительной головки. Ранее так же был разработан метод комплексной термокомпесации измерительного канала трехосного АК [8]. Преимущество такой методики заключалось в отсутствии необходимости позиционирования трехосного АК с высокой точностью в термокамере. Однако в этом методе компенсация проводилась без учета динамики изменения температуры, что является большим недостат-

ком при применении ИИМ для быстро движущихся объектов, внутри которых возникают резкие перепады температуры. Так же был разработан ряд методик оценки температурных зависимостей акселерометров с помощью нейронных сетей [9, 10], но использование таких методов для построения корректирующих звеньев является крайне затруднительным из-за сложности их алгоритмов.

В данной работе представлены результаты исследования температурной характеристики погрешности детерминированного смещения нуля [11] измерительных каналов трехосного акселерометра. Описаны основные принципы метода алгоритмической термокомпенсации, который основан на применении двух наборов аппроксимирующих функций для аппроксимирующей модели температурных погрешностей выходных сигналов трехосного АК в зависимости от температуры внешней среды. Приведены результаты применения метода.

Описание исследуемого образца трехосного акселерометра

Для отработки метода, исследования проводились с трехосным АК, который состоит из трех маятниковых акселерометров навигационного класса с кварцевыми чувствительными элементами. Данный тип трехосного АК разработан в КП СПС«Арсенал» и используется в ИИМ, которые предназначены для решения навигационных задач различных подвижных объектов, в том числе для бесплатформенных инерциальных навигационных систем повышенной точности используемых для ракет-носителей. Функциональная схема измерительного канала такого трехосного АК представлена на рис. 1.

БПС трехосного АК, предназначен для преобразования аналоговых сигналов трех АК, расположенных по трем взаимоортогональным осям (рис. 1) в виде сигналов постоянного тока в диапазоне ±15 мА в цифровую форму в виде 16-разрядных целых чисел в дополнительном коде, пропорциональных приращению входного сигнала по времени за период цикла преобразования (τ).

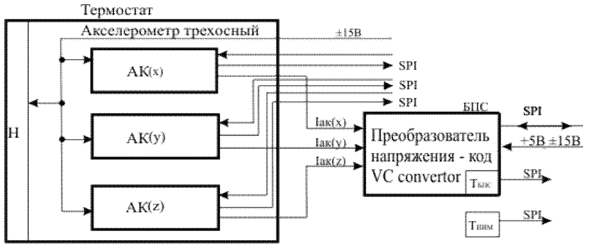

Рис. 1. Функциональная схема измерительного канала трехосного АК: АКx(y,z) – акселерометры; БПС – блок преобразования сигналов; Н – нагреватель; SPI – интерфейс информационного обмена; $T_{БПС}$ – термодатчик на плате БПС; $T_{ИИМ}$ – термодатчик для измерения температуры внешней среды, размещенный на корпусе ИИМ.

По схемотехническому решению БПС относится к классу интегрирующих АЦП с уравновешиванием заряда, сравнивающим приращение входного тока за период цикла преобразования с определенным элементарным значением заряда Q_e, определяющим цену младшего разряда выходного целочисленного кода [3]. Тогда, принимая, что входной ток во время цикла преобразования предполагается неизменным, приращение заряда за это время представляется простым произведением:

$$Q_e = I_{x(y,z)} \times \tau \ .$$

Представив значение порогового заряда как аналогичное по форме произведение эквивалентной разрешающей способности по току на длительность цикла преобразования, получим:

$$Q_e = I_e \times \tau \ .$$

Принцип работы БПС заключается в оценке и последующем преобразовании в цифровую форму отношения $Q_{x(y,z)}/Q_e$, которое, с учетом приведенного выше, сводится к отношению токов $I_{x(y,z)}/I_e$. Тогда с учетом инструментального смещения нуля, характеристика преобразования БПС по каждому из каналов $АК_{x(y,z)}$ описывается формулой:

$$N_{x(y,z)} = round\left[\left(I_{x(y,z)} + \Delta I_{sx(y,z)}\right)/I_e\right],$$

где $I_{x(y,z)}$ – входной ток канала x(y,z) БПС, [мА];

$\Delta I_{sx(y,z)}$ – приведенное ко входу инструментальное смещение нуля соответствующего измерительного канала БПС, [мА];

$I_e = Q_e/\tau$ – эквивалентная разрешающая способность БПС по току [мА];

round – операция округления до ближайшего целого;

$N_{x(y,z)}$ – значение целочисленного цифрового кода на выходе БПС, [1/цикл].

Таким образом, произведение $N_{x(y,z)} \times Q_e$ имеет размерность [(мА×с)/цикл] и представляет собой квантованное по уровню значение приращения интеграла входного сигнала за период цикла преобразования.

На практике для удобства применяется другая форма записи формулы характеристики преобразования:

$$N_{x(y,z)} = round\left[K_{x(y,z)} \times \left(I_{x(y,z)} + \Delta I_{sx(y,z)}\right)\right] \quad (1)$$

где $K_{x(y,z)} = 1/I_e$ – масштабный коэффициент ИК x(y,z), [мА×цикл$^{-1}$].

Выражение (1) может быть представлено в виде:

$$N_{x(y,z)} = K_{x(y,z)} \times I_{x(y,z)} + K_{x(y,z)}\Delta I_{sx(y,z)} = \\ = N_{cx(y,z)} + \Delta N_{sx(y,z)}, \quad (2)$$

где $N_{cx(y,z)}$ – центрированное значение цифрового кода на выходе ИК, [1/цикл]; $\Delta N_{sx(y,z)}$ – приведенное к выходу смещение нуля, [1/цикл].

Очевидно, что задав равные по модулю, но противоположные по знаку значения входного тока и при этом зафиксировав соответствующие значения выходного кода $N^{+}_{x(y,z)}$ и $N^{-}_{x(y,z)}$, можно определить:

$$\Delta N_{sx(y,z)} = \left(N^{+}_{x(y,z)} - N^{-}_{x(y,z)}\right)/2, \quad (3)$$

$$N^{p}_{sx(y,z)} = \left(N^{+}_{x(y,z)} + N^{-}_{x(y,z)}\right)/2, \quad (4)$$

$N^{p}_{sx(y,z)}$ – положительное центрированное значение цифрового кода на выходе БПС, соответствующее значению входного тока, равному $I^{p}_{x(y,z)}$.

При этом для каждого ИК x(y,z) могут быть рассчитаны:

$$K_{x(y,z)} = N^{+}_{cx(y,z)} / I^{+}_{x(y,z)}, \quad (5)$$

где $K_{x(y,z)}$ – значение масштабного коэффициента ИК;

$$\Delta I_{sx(y,z)} = \Delta N_{sx(y,z)} / K_{x(y,z)}.$$

К параметрам инструментального смещения нуля $\Delta I_{sx(y,z)}$ (или $\Delta N_{sx(y,z)}$) наряду с требованиями, аналогичными требованиям к $K_{x(y,z)}$, предъявляется требование минимизации его (смещения) абсолютной величины, т.к. от его уровня зависит динамический диапазон преобразовываемого сигнала.

Реализация БПС, примененного в исследуемом трехосном АК, обеспечивая выполнение требования минимизации временного дрейфа, не обеспечивает того же в отношении температурного, что требует принятия дополнительных мер для компенсации его влияния на результат преобразования.

Описание аппроксимирующей модели температурной погрешности

В докладе [8] было приведено определение, что температурный дрейф термостатированного трехосного АК проявляется в том, что при не зависящем от температуры значении входного тока $I_{x(y,z)}$ на выходе БПС наблюдается существенная с точки зрения точности преобразования погрешность значений выходных кодов $N_{x(y,z)}$, которая обусловлена влиянием изменения температуры окружающей среды. На основании наблюдения факта воспроизводимости температурного дрейфа в серии повторяющихся испытаний можно полагать, что существует функция $f^{T}_{x(y,z)}(\Delta T)$, которая с достаточной точностью аппроксимирует зависимость выходной информации каналов трехосного АК от изменения температуры ΔT. Так как в составе трехосного АК предусмотрено наличие датчика температуры в БПС, то аппроксимирующая функция $f^{T}_{x(y,z)}(\Delta T)$ трансформируется в другую – $F^{T}_{x(y,z)}(N_t)$, где N_t – выходной код термодатчика. Такая функция устанавливает взаимно однозначное соответствие между показаниями термодатчика и значениями выходного кода измерительных каналов. С учетом того, что БПС предназначен для преобразования значений входного тока в цифровую форму, функция должна быть от двух независимых переменных:

$$N_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) = F^{T}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right), \quad (6)$$

где $A_{x(y,z)}$ – выходной сигнал измерительных каналов трехосного АК.

В соответствии с выражениями (2)…(4) для каждой пары значений $\left\{A_{x(y,z)}, N_t\right\}$ должно существовать однозначное представление выходного кода измерительных каналов трехосного АК в виде суммы его центрированного значения и приведенного к выходу смещения нуля, отсюда следует, что функция (6) представима в виде суммы двух функций:

$$F^{T}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) = N_{cx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) + \\ + \Delta N_{sx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right). \quad (7)$$

Рассмотрим первое слагаемое в правой части уравнения (7). В соответствии с назначением БПС, для любого N_t оно должно представлять линейную функцию от входного тока. По аналогии с выражением (2) его можно представить в виде:

$$N_{cx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) = K_{x(y,z)}\left(N_t\right) \cdot A_{x(y,z)}, \quad (8)$$

здесь $K_{x(y,z)}(N_t)$ представляет функцию, отражающую зависимость масштабного коэффициента измерительных каналов трехосного АК от показаний датчика температуры. Для описания относительного изменения центрированного значения цифрового кода измерительных каналов трехосного АК, вызванного изменением температуры, введем в рассмотрение нормированную аппроксимирующую функцию $F^{T}_{cx(y,z)}(N_t)$:

$$N_{cx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) = N_{cx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, 0\right) \times \\ \times F^{T}_{cx(y,z)}\left(N_t\right). \quad (9)$$

Таким образом, нормированная аппроксимирующая функция $F^{T}_{cx(y,z)}(N_t)$ описывает относительное изменение центрированного значения цифрового кода на выходе измерительного канала трехосного АК при неизменном входном токе БПС, вызванное изменением температуры относительно нормальных условий работы (ΔT = 0, при 20°C). Эта функция тождественна функции, которая описывает относительное изменение масштабного коэффициента измерительных каналов трехосного АК вызванное изменением температуры окружающей среды.

Второе слагаемое в уравнении (6) по определению не зависит от входного тока (см.уравнение (3)) т.е. является функцией одной переменной N_t:

$$\Delta N_{sx(y,z)}\left(A_{x(y,z)}, N_t\right) = \Delta N_{sx(y,z)}\left(N_t\right).$$

Поскольку в практике аппроксимации температурных зависимостей широко используется подход с применением нормированных аппроксимирующих функций [5], представим аддитивную температурную погрешность смещения нуля в виде:

$$\Delta N_{sx(y,z)}\left(N_t\right)=\Delta N_{sx(y,z)}\left(0\right)+F^T_{sx(y,z)}\left(N_t\right),$$

где $\Delta N_{sx(y,z)}\left(0\right)$ – значение приведенного к выходу смещения нуля при нормальных условиях работы; $F^T_{sx(y,z)}\left(N_t\right)$ – аппроксимирующая функция, нормированная по отношению к смещению нуля.

Для $F^T_{sx(y,z)}\left(N_t\right)$ и $F^T_{cx(y,z)}\left(N_t\right)$ должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} F^T_{cx(y,z)}\left(N_t\right)=1 \\ F^T_{sx(y,z)}\left(N_t\right)=0 \end{cases}.$$

Функции $F^T_{sx(y,z)}\left(N_t\right)$ и $F^T_{cx(y,z)}\left(N_t\right)$ могут быть получены путем обработки выходных сигналов измерительных каналов трехосного АК в ходе температурных испытаний. Обычно такие функции представляют собой степенной ряд вида:

$$F^T\left(N_t\right)=1+a_1\times N_t+a_2\times\left(N_t\right)^2+$$
$$+a_3\times\left(N_t\right)^3+a_1\times N_t+\ldots an\times\left(N_t\right)^n. \qquad (10)$$

Организация испытаний и исследование экспериментальных данных

Перед началом проведения температурных испытаний исследуемого образца трехосного АК температурные датчики $T_{БПС}$ и $T_{ИИМ}$ были откалиброваны таким образом, что их выходные сигналы соответствовали отклонению температуры окружающей среды от номинальной 20°C (см. рис. 3). Образец был помещен в термокамеру WEISS WT-1000 (рис. 2) с запрограммированным режимом работы на отработку температур в диапазоне от 5 до 35 °C.

Рис. 2. Термокамера Weiss WT-1000

Для набора данных, необходимых для определения зависимости функции $F^T_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right)$ от проекций ускорения на оси чувствительности АК исследуемые образец с помощью специального приспособления устанавливался в камере WEISS.

Так как погрешность отработки заданной температуры данным типом термокамеры составляет ±0,1°C, ее датчики можно принимать в качестве образцовых измерителей температуры для данного испытания. Циклограмма работы термокамеры изображена на рис. 3.

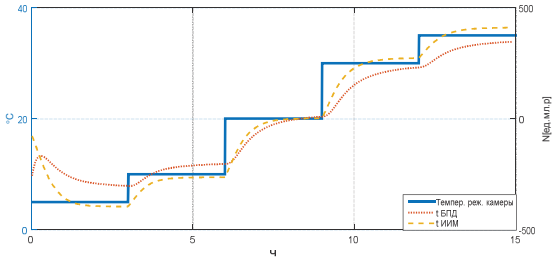

Рис. 3. Изменение температуры внутри корпуса ИИМ и на плате БПС относительно циклограммы термоиспытаний.

Для набора данных, необходимых для определения зависимости функции $F^T_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right)$ от проекций ускорения на оси чувствительности АК исследуемые образец с помощью специального приспособления устанавливался в камере WEISS WT-1000 в различных положениях относительно гравитационного поля Земли. Для каждой пространственной ориентации трехосного АК отрабатывалась циклограмма термоиспытаний данной методики (рис. 3).

На основании полученных экспериментальных данных, используя временну́ю привязку температурного режима камеры и показаний термодатчиков $T_{БПС}$ и $T_{ИИМ}$ можно определить характер воздействия температуры в пределах объема ИИМ, в составе которого проходил испытания измерительный канал трехосного АК (рис. 1).

Как видно из графиков выходных сигналов, термодатчик в БПС реагирует на изменение температуры внешней среды с некоторым временным запаздыванием относительно корпусного термодатчика ИИМ. Данный эффект дает возможность применять рекурсивные функции для того, чтобы с достаточной точностью определять момент изменения динамики влияния температуры на трехосный АК.

Для исследования влияния динамики изменения температуры внешней среды на смещение нуля выходных сигналов трехосного АК (рис. 4, а) рассмотрим производные от сигналов $T_{БПС}$ и $T_{ИИМ}$ (рис. 4, б). Экспериментальные данные позволяют сделать выводы о том, что погрешность смещения нуля измерительного канала трехосного АК значительно возрастает при динамическом режиме изменения температуры, который соответствует времени перехода термокамеры на новый температурный режим согласно циклограмме рис. 3.

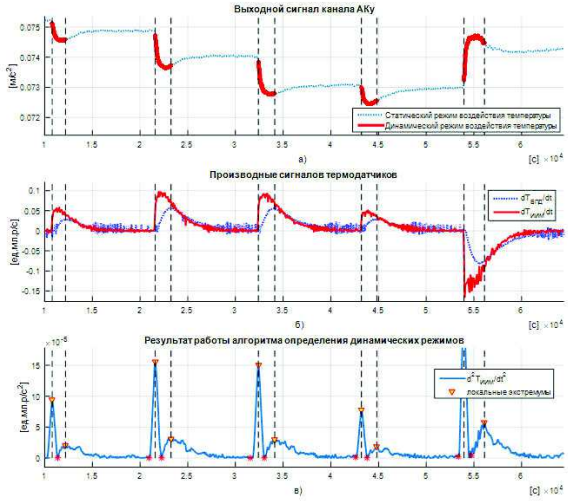

Рис. 4. Результаты исследования экспериментальных данных

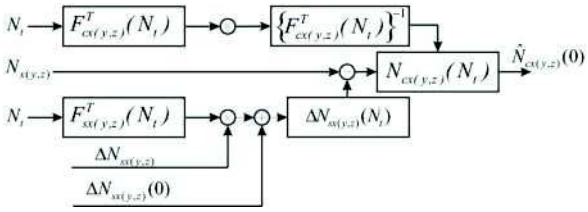

Рис. 5. Общая схема корректирующего звена для режимов температурного воздействия

После окончания интенсивного изменения температуры в термокамере наблюдается статический режим воздействия температуры на выходные сигналы трехосного АК, для которого характерно наличие постоянного дрейфа нуля за счет постепенного самопрогрева блоков ИИМ.

Погрешность аппроксимации при использовании модели (7) возникает из-за несоответствия полиномов аппроксимирующих функций $F^T_{sx(y,z)}(N_t)$ и $F^T_{cx(y,z)}(N_t)$ участкам с динамическим воздействием температуры. На рис. 6 указаны нескомпенсированные участки, которые соответствуют режимам динамического воздействия температуры на выходной сигнал трехосного АК. На основании данных наблюдений очевидно, что применение температурной модели (7) должно быть алгоритмическим:

$$F^T_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right)=\begin{cases}F^{Td}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right), S\left(\dfrac{d^2T_{\text{ИИМ}}}{dt^2}\right)=1\\ F^{Ts}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right), S\left(\dfrac{d^2T_{\text{ИИМ}}}{dt^2}\right)=0\end{cases},$$

где $F^{Td}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right)$ – функция, аппроксимирующая зависимость выходных данных трехосного акселерометра от динамического режима изменения температуры, $F^{Ts}_{x(y,z)}\left(A_{x(y,z)},N_t\right)$ – функция, аппроксимирующая зависимость выходных данных трехосного акселерометра от статического режима изменения температуры, $S\left(\dfrac{d^2T_{\text{ИИМ}}}{dt^2}\right)$ – алгоритм, определяющий режим изменения температуры (результат работы алгоритма представлен на рис. 4, в).

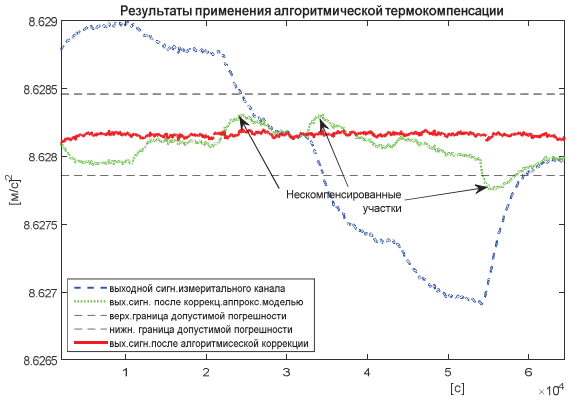

Рис. 6. Результаты обработки выходного сигнала измерительного канала трехосного акселерометра упрощенной и алгоритмической компенсацией

Конечная цель термокомпенсации температурной погрешности измерительных каналов трехосного АК заключается в обработке выходной информации $N_{x(y,z)}$, полученной при произвольной текущей температуре корректирующим алгоритмом для расчета прогнозного значения $\hat{N}_{x(y,z)}(0)$, которое могло бы быть сформированным при том же входном токе в нормальных условиях работы (при 20°C). На основании изложенных исходных предпосылок алгоритм корректирующего звена для каждого из температурных режимов может быть представлен схематически (рис. 5).

Представленный на схеме алгоритм коррекции является общим для статического и динамического режимов изменения температуры. Отличие заключается только в полиномах (10) аппроксимирующих функций $F^T_{sx(y,z)}(N_t)$ и $F^T_{cx(y,z)}(N_t)$.

Необходимыми априорными данными для работы такого алгоритма являются:

1) приведенное к выходу смещение нуля $\Delta N_{sx(y,z)}(0)$, измеренное в нормальных условиях;

2) изменение смещения нуля $\Delta N_{sx(y,z)}$, зафиксированное на данном участке температур относительно $\Delta N_{sx(y,z)}(0)$;

3) нормированная аппроксимирующая функция термозависимости смещения нуля $F^T_{sx(y,z)}(N_t)$;

4) нормированная аппроксимирующая функция термозависимости центрированного значения $F^T_{cx(y,z)}(N_t)$.

В случае статического режима воздействия температуры полиномы аппроксимирующих функций $F^T_{sx(y,z)}(N_t)$ и $F^T_{cx(y,z)}(N_t)$ для исследуемого образца трехосного АК являются линейными, в случае динамического – квадратичными. В общем случае, когда линейная аппроксимация не удовлетворяет требованиям заданной точности, возможно применение сплайновой или экспоненциальной аппроксимации.

Общий результат обработки алгоритмом коррекции выходной информации всех трех измерительных каналов трехосного АК представлен на рис. 7 как расчетное значение модуля ускорения свободного падения $\hat{g}$ [м/с^2], определенное по формуле $\hat{g} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}$.

Экспериментальные данные были получены во время температурных испытаний исследуемого образца трехосного АК в составе ИИМ по циклограмме, которая представлена на рис. 3, при этом образец был установлен на неподвижном относительно Земли основании.

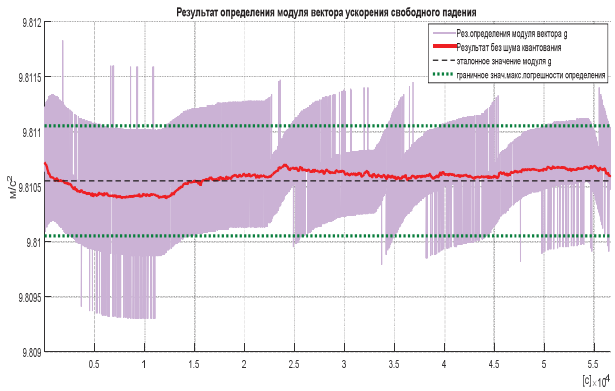

Рис. 7. Результат определения модуля ускорения свободного падения на основе выходной информации измерительных каналов трехосного акселерометра полученной в результате температурных испытаний

Выводы

В работе представлены результаты применения алгоритмического метода термокомпенсации на основании нормированных аппроксимирующих функций смещения нуля и масштабного коэффициента выходных сигналов измерительных каналов трехосного АК. Особенностью данного метода является возможность индикации динамического и статического температурных режимов и применения для каждого из них отдельных коэффициентов. Успешность применения такого метода подтверждается теоретическими расчетами прогнозируемых сигналов акселерометров и экспериментальными испытаниями корректирующего звена.

Отличие рассматриваемого метода от наиболее распространенных в практике компенсации температурных зависимостей акселерометрических измерительных каналов заключается в отсутствии необходимости автономной термокомпенсации электронных блоков обработки сигналов и в прецизионном позиционировании трехосного АК в термокамере.

Данный метод может быть так же использован для ИИМ, конструктивные решения которых не предусматривают наличие термостатированного объема.

Перспектива дальнейших исследований

Компенсация температурных дрейфов измерительных каналов трехосного акселерометра может быть усовершенствована путем исследования влияния динамических нагрузок при испытаниях в различных температурных режимах, что может быть реализовано при наличии поворотного стенда с термокамерой. Так же возможно существенно расширить методику термокомпенсации при наличии в конструкции ИИМ и маятниковых АК дополнительных температурных датчиков.

Литература

1. Oliver J. Woodman. An introduction to inertial navigation. Technical reports published by the University of Cambridge, Cambridge 2007, p.37.
2. Венгеровский Л. В. Системы термостатирования в радиоэлектронике / Л. В. Венгеровский, А. Х. Ванштейн. – М.: Энергия, 1969.
3. Официальный сайт производителя Texas Instruments [Электронный ресурс] : Analog to Digital Converter > Precision ADC (<=10MSPS). – Режим доступа: http://www.ti.com/lsds/ti/data-converters/precision-adc-less-10msps-technical-documents.page
4. Пат. 2399156 Российская Федерация, МПК7 H 03 M 1/10, H 03 M 1/06. Способ коррекции погрешностей аналого-цифрового преобразования и устройство для его осуществления [Текст] / Валиков В. В.; патентообладатель ООО "Научно-производственное объединение "МИР". – № РД0075560; заявл. 18.09.2009; опубл. 10.09.2010. – 3 с.: ил.
5. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis. IEEE Std. 1554, 2005.
6. Claudia C., Meruane Naranjo. Analysis and Modeling of MEMS base Inertial Sensors. KTH Electrical Engineering, Stockholm 2008, p. 51.
7. Chernyak N. G., Khazinehdarloo E., Cherniak K. N. Calibration of navigation pendulous accelerometer by testingrotating method in terrestrial gravitational field. Interdepartmental scientific and technical collection "Adaptive automatic control system", Issue 15, 2009, p. 31 – 37.
8. Кунец Г. А. Принцип и методика компенсации температурной зависимости блока акселерометров БИНС / Г. А. Кунец, А. В. Воробьев // X Міжнародна науково-технічна конференція

"Приладобудування: стан і перспективи". – 2014. – Вип. 47. – С. 38 – 39.
9. L.T. Grigorie. The bias temperature dependence estimation and compensation for an accelerometer by the use of the neuro-fuzzy techniques. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 32, no. 3-4, 2008, p. 383-400.
10. Y. J. Pan, L. L. Li, C. H. Ren, H. L. Luo. Study on the compensation for a quartz accelerometer based on a wavelet neural network. Measurement Science & Technology, vol. 21, no. 10, 2010, p.102–115.
11. Titterton D. H. and Weston J. L. Strapdown Inertial Navigation Technology. – IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 17, 2004, p.558.

УДК 531.383

С. В. Головач
Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», м. Київ, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТРИВІСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Приведено метод комплексної алгоритмічної компенсації температурних дрейфів вимірювальних каналів тривісного акселерометра у складі інерціального вимірювального модуля. Згідно технічним характеристикам досліджуваний зразок у процесі експлуатації повинен витримувати різку зміну температури навколишнього середовища, що суттєво ускладнює задачу компенсації температурної похибки. Метод ґрунтується на індикації режимів впливу температури та визначені нормованих апроксимуючих функцій для компенсації похибки вихідних сигналів тривісного акселерометра. В якості апріорних даних використовуються сигнали температурних датчиків, що встановлені у різних частинах вимірювального каналу тривісного акселерометра, а також вихідні сигнали чутливих елементів маятникових акселерометрів, встановлених у термостабілізованому об'ємі, що були отримані в процесі температурних випробувань.
Ключові слова: акселерометри, вимірювальний канал, температурний дрейф, апроксимація.

S. V. Golovach
SDP SE «Arsenal», Kyiv, Ukraine

THE RESULTS OF APPLYING THE METHOD OF ALGORITHMIC TEMPERATURE DRIFT COMPENSATION FOR THREE-AXIS ACCELEROMETER

A method of complex algorithmic temperature drifts compensation for three-axis accelerometer is describes. The three-axis accelerometer is reviews as the part of inertial measurement unit in this paper. According to the specifications for the test sample of inertial measurement unit it must work with prescribed accuracy when the ambient temperature changes rapidly. So the rapid temperature change makes the task of temperature compensation more complicate. Current method based on principles of different temperature intensity influence indication. For each of temperature intensity kind the normalized approximation functions are determine. That functions make up a correcting algorithm for temperature drift error. The output signals of inertial measurement unit temperature sensors are used as apriority data for solving approximation tasks.
Key words: accelerometers, measuring channel, temperature drift, approximation.

Надійшла до редакції
26 січня 2016 року

Рецензовано
10 лютого 2016 року

© Головач С. В., 2016