УДК 681.2.088

А. А. Крылов, П. С. Кузнецов

Устранение смещения нуля МЭМС-гироскопов при различной температурной динамике

Описаны физические причины дрейфа нуля и его зависимость от температуры. Для выявления картины зависимости дрейфа от температуры при разной динамике нагрева поставлены эксперименты с разными интервалами включения. Исследованы корреляции между дрейфом и температурой для разных интервалов включения в ряде значимых временных точек от включения. Предложен способ компенсации дрейфа при различной динамике нагрева, определяющий наиболее близкий к текущей температурной динамике интервал.

Ключевые слова: калибровка гироинерциального блока, дрейф нуля МЭМС-гироскопов, полиномы Лагранжа.

Настройка и калибровка МЭМС-гироскопов проводятся в составе гироинерциального блока (ГИБ), который построен в виде моноблочного корпуса (рис. 1). В нем установлены три датчика угловой скорости (ДУС), в состав которых входят микромеханические чувствительные элементы угловой скорости *LL*-типа, заключенные в стеклянную капсулу, и микросхема обработки (*ASIC*). В состав ГИБ также входит программируемый микроконтроллер, который позволяет в реальном времени корректировать показания МЭМС-гироскопов с учетом выявленных систематических погрешностей. В памяти микроконтроллера хранятся алгоритмы обработки и калибровочные данные, которые могут быть многократно скорректированы и перезаписаны в процессе калибровки изделия. ГИБ выдает информацию с частотой 1000 Гц. Рабочий диапазон измеряемых угловых скоростей прибора ± 500 °/с.

Рис. 1. ГИБ со снятой крышкой корпуса

Настройка и калибровка ГИБ заключаются в определении корректирующих коэффициентов для алгоритмов компенсации погрешностей по следующим параметрам:

- нелинейности масштабного коэффициента;
- неортогональности ориентации осей ГИБ;
- зависимости смещения нуля от линейного ускорения;
- учета начального (при включении) смещения нуля;
- температурного дрейфа нуля МЭМС-гироскопов.

В ходе калибровки гироскопов особую трудоемкость представляет компенсация смещения и дрейфа нуля, в поведении которых имеется много случайных факторов, и наличие большого количества статистических данных не гарантирует возможность корректного описания этих погрешностей. Необходимо учитывать свойства конкретного прибора для более точного построения модели погрешности.

В общем случае смещение нуля имеет две составляющие – начальное смещение нуля и дрейф нуля. Физической причиной дрейфа нуля является изменение размеров кремниевых элементов и давления внутри капсулы из-за изменения температуры. Этими факторами обусловлено изменение собственной частоты гироскопов и, как следствие, их выходных показаний [1, 2]. Изменение температуры зависит от влияния внешней температуры и внутреннего нагрева датчика из-за близкого расположения тепловыделяющих компонентов. Последний указанный фактор особенно проявляется

в приборах небольшого размера, в которых возможность размещения датчиков и организации отвода тепловой энергии от источника вторичного питания ограничена. ГИБ имеет небольшие габариты, поэтому точная компенсация смещения должна учитывать оба фактора изменения температуры.

Следует отметить, что погрешность имеет систематическую и случайную составляющие. Алгоритмически может быть устранена лишь систематическая составляющая, в таком случае случайная будет определять значение погрешности. Случайная составляющая не может быть устранена без вмешательства во внутренние процессы МЭМС-датчика за исключением возможного применения фильтрации. В данной работе применение фильтрации не рассматривается.

Смещением нуля гироскопа является отличие его показаний от нулевого значения при отсутствии воздействия на него угловой скорости. Дрейф нуля на временном отрезке определяется как разность максимума и минимума смещения нуля (вычисленного по низкочастотной составляющей сигнала) на этом отрезке.

В процессе изучения поведения дрейфа МЭМС-гироскопов в составе ГИБ была установлена явно выраженная зависимость дрейфа нулевого сигнала от температуры, измеряемой датчиком температуры, интегрированным в ДУС (на рис. 2 математически устранено начальное смещение нуля, температура указана в исходных единицах термодатчика).

Похожие результаты были получены в работах [3–5].

На рис. 2 показана зависимость смещения нуля от внутреннего нагрева, однако она может меняться при различных уровнях нагрева конструкции, обусловленных временем, прошедшим с момента последнего включения. При этих же условиях меняется и начальное смещение нуля.

Стабильные точностные характеристики прибора обеспечиваются устойчивостью к внешнему температурному воздействию и времени от предыдущего включения. Для этого необходимо смоделировать компенсационную функцию для набора температур в рабочем диапазоне (пример с изменением внешней температуры представлен в работе [6]),

Рис. 2. Зависимость смещения нуля от температуры: $dr1xG1_i$ – низкочастотная составляющая сигнала гироскопа после включения; $Tx1_i$ – сигнал температурного датчика после включения; F_n – частота выдачи информации прибора; i – количество точек

а также для разной продолжительности между включениями. При используемой схеме могут быть измерены только температуры внутри МЭМС-датчиков. Время, прошедшее с момента последнего выключения прибора, косвенно оценивается в ходе работы прибора по показаниям термодатчика. На рис. 2 заметно сходство графиков роста температуры (по причине внутреннего нагрева) после включения и изменения смещения нуля.

С целью исследования дрейфа нуля изучают серии по 5 включений с определенным интервалом между включениями (рис. 3). Для эксперимента был взят следующий ряд интервалов между включениями: 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 мин (ось абсцисс) – для каждой серии используется свой интервал. Значение дрейфа рассчитывается за все время работы прибора (2 мин). Между сериями происходит длительный перерыв (прибор находится в выключенном состоянии в низковольтном комплексном устройстве) продолжительностью в 1 ч для обеспечения полного остывания прибора. Для выявления систематической погрешности серия записывается в одних и тех же условиях 3 раза. Соответственно значения по каждому номеру включения для одного интервала усредняются, усредненные данные используются для дальнейшего анализа.

Рис. 3. График роста температуры и дрейфа на сериях из пяти включений:

а – показания температурного датчика ($1^\circ = 200$ единиц) при разных интервалах времени между включениями (ось абсцисс), $ii1$ – номер интервала между включениями; vr_{ii1} – интервал между включениями;

$TX_{ii1}^{(0)}$ – значение температурного датчика на k -м включении; — — — $[(TX_{ii1}^{(0)})_0]$; — — — $[(TX_{ii1}^{(0)})_1]$; — — — $[(TX_{ii1}^{(0)})_2]$; — — — $[(TX_{ii1}^{(0)})_3]$; — — — $[(TX_{ii1}^{(0)})_4]$; б – значения дрейфа при разных интервалах времени между включениями (ось абсцисс); $DrX_{ii1}^{(0)}$ – значение температурного дрейфа на k -м включении; — — — $[(DrX_{ii1}^{(0)})_0]$; — — — $[(DrX_{ii1}^{(0)})_1]$; — — — $[(DrX_{ii1}^{(0)})_2]$; — — — $[(DrX_{ii1}^{(0)})_3]$; — — — $[(DrX_{ii1}^{(0)})_4]$

При интервалах между включениями более 15 мин разница между первым включением и остальными как по температуре, так и по дрейфу становится незаметной, поэтому можно считать данные включения независимыми (см. рис. 3). Для остальных имеет смысл подробнее проанализировать влияние частичного остывания на рост температуры и изменение дрейфа.

Назовем корреляционной зависимостью в каждой точке частное дрейфа нуля и роста температуры с начала измерений (т. е. на нулевой секунде температуру принимаем за 0).

Корреляционные точки определяются так:

$$gt_i = \frac{g_i}{t_i},$$

где g – низкочастотная составляющая значений гироскопа;

t – показания датчика температуры (за вычетом начального смещения);

$i = 0 \dots n$;

n – количество измерений.

В соответствии с требованиями к прибору время измерения дрейфа – 2 мин.

На рис. 4 изображены корреляционные кривые для каждого номера включения. Можно отметить, что для первого включения значения стабильны (так как между сериями про-

ходит достаточное для остывания прибора время). Остальные включения похожи друг на друга, однако имеются отличия, показывающие некоторое уменьшение корреляционных значений для каждого следующего включения. С возрастанием интервала между включениями разница между включениями с соседними номерами становится менее значительной.

С целью исследования динамики изменения корреляционной зависимости изучались ее значения через разное время после включения. На рис. 5 изображены кривые, описывающие изменение дрейфа за 2, 5, 30, 60 и 120 с (соответственно красная, синяя, фиолетовая, голубая и оранжевая линии) для 5-го включения. Очевидно, что существует различие между значениями при разных интервалах внутри серии (см. рис. 5).

Для учета всех возможных вариантов развития событий можно определить калибровочные коэффициенты для всех интервалов. В процессе работы прибора необходимо определить вариант применения этих коэффициентов для конкретного случая. Например, в качестве начального может быть взят вариант независимого включения (30 мин), а по ходу коэффициента меняется в зависимости от текущего роста температуры. Для сокращения количества вычислений и объема занимаемой памяти можно

Рис. 4. Значения корреляционных зависимостей (частных значений дрейфа и показаний температурного датчика) при разных интервалах времени между включениями (ось абсцисс):

$ii1$ – номер интервала между включениями; vr_{ii1} – интервал между включениями; $DrX_{ii1}^{(0)}$ – значение температурного дрейфа на k -м включении; $TX_{ii1}^{(0)}$ – значение температурного датчика на k -м включении;

$$\begin{aligned} & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_0}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_0}; & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_1}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_1}; \\ & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_2}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_2}; & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_3}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_3}; \\ & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_4} \end{aligned}$$

не учитывать интервалы более 15 мин и считать 15-минутный интервал независимым. При калибровке на всем температурном диапазоне коэффициенты вычисляются на ряде температурных точек, покрывающих весь диапазон.

Так как время работы прибора предполагается не более двух минут, модель изменения температуры можно представить как начальную внешнюю температуру плюс внутренний нагрев.

При калибровке ГИБ для компенсации дрейфа обычно используется полиномиальная аппроксимация [7]. В одной из предыдущих работ была предложена кусочно-линейная аппроксимация [3]. В данной статье представлена ее модификация с введением корреляцион-

Рис. 5. Графики корреляционной зависимости за $int_j = 2, 5, 30, 60$ и 120 с в зависимости от времени между включениями:

$ii1$ – номер интервала между включениями; vr_{ii1} – интервал между включениями; $DrX_{ii1}^{(j)}$ – значение температурного дрейфа на k -м включении; $TX_{ii1}^{(j)}$ – значение температурного датчика на k -м включении; $j = 0...4$ – номер интервала от включения, на котором измерялась корреляционная зависимость;

$$\begin{aligned} & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(0)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(0)}]_4}; & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(1)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(1)}]_4}; \\ & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(2)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(3)}]_4}; & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(3)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(4)}]_4}; \\ & \text{—} - \frac{[(DrX_{ii1})^{(4)}]_4}{[(TX_{ii1})^{(5)}]_4} \end{aligned}$$

ных зависимостей и зависимостью от времени остывания.

Находится ряд точек, соответствующих наибольшим перегибам графиков дрейфа, а точки между ними вычисляются пропорционально расстоянию до соседних. Перед аппроксимацией дрейфа проводится его фильтрация методом скользящего окна с частотой, соответствующей частоте работы прибора (1000). Значения в опорных точках рассчитываются по формуле

$$d_j = \frac{\sum_{i=0}^{10} g t_{i-5}}{10},$$

где $j = 0...m$;

Таблица

Значения дрейфа при калибровке с обычным алгоритмом компенсации и модифицированным

Условия/значения дрейфа, %/с		ГИБ 1			ГИБ 2		
Тип калибровки	Температура, °С	X	Y	Z	X	Y	Z
Обычная	+30	0,015	0,020	0,012	0,013	0,009	0,006
	+33	0,018	0,017	0,016	0,009	0,014	0,016
	+40	0,008	0,019	0,013	0,010	0,012	0,011
Модифицированная	+30	0,012	0,013	0,010	0,008	0,004	0,005
	+33	0,011	0,01	0,014	0,007	0,008	0,009
	+40	0,006	0,015	0,011	0,005	0,006	0,008

m – количество опорных точек;

gt_{i-5} – точка из корреляционного массива.

Значение в любой другой точке в момент времени tx

$$dt_k = d_{j-1} + \frac{d_j - d_{j-1}}{t_j - tx},$$

где $k = 0 \dots n - m$ – номера всех точек за исключением опорных.

По такому же принципу рассчитываются коэффициенты для текущей температуры. Заранее вычисляются калибровочные коэффициенты на температурных точках. В случае попадания текущей температуры в точку берутся ее коэффициенты, для температуры между точками рассчитывается пропорциональное промежуточное значение:

$$dt_k = d_{T_{j-1}} + \frac{d_{T_j} - d_{T_{j-1}}}{t_{T_j} - tx},$$

где T_j – калибровочная температурная точка, большая текущей температуры;

T_{j-1} – калибровочная температурная точка, меньшая текущей температуры.

Для учета предположительного номера включения оценивается рост температуры в данной временной точке, также кусочно-линейным методом вычисляется итоговое dt_n между двумя соседними включениями:

$$dt_n = dt_{n1} + \frac{dt_{n2} - dt_{n1}}{dt_{n1} - T},$$

где dt_{n1} – номер включения с большим ростом температуры;

dt_{n2} – номер включения с меньшим ростом температуры (предполагается, что с каждым следующим включением температура растет меньше);

T – рост температуры на данном временном интервале.

Для своевременной коррекции может быть выбрано несколько временных точек, например, в эксперименте, изображенном на рис. 4, это 2, 5, 30, 60 с.

В таблице показаны результаты применения алгоритма в сравнении с обычным кусочно-линейным на калибруемых температурных точках и между ними. Для оценки взяты температуры +30 и +40 °С, для которых вычислялись калибровочные коэффициенты (опорные), а также одна промежуточная температура +33 °С.

Можно сделать вывод (см. таблицу), что применение модифицированного алгоритма с определением и учетом времени между включениями дает улучшение значения дрейфа в 1,3–2 раза по сравнению с калибровкой обычным алгоритмом (полиномы Лагранжа без учета температурной динамики).

Список литературы

1. Лысенко И. Е. Влияние температурных и технологических погрешностей на динамику трехосевого микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2006. № 2. С. 6.
2. Вторушин С. Е., Аришинова А. А., Нестеренко Т. Г. Температурный дрейф собственных частот микромеханического гироскопа // Вестник науки Сибири. 2014. № 1. С. 3–5.
3. Крылов А. А., Корниюк Д. В. Технологические подходы к устранению дрейфа нуля микромеханических гироскопов // Известия ТулГУ. 2018. Вып. 5. С. 93–98.
4. Prikhodko I. P., Trusov A. A., Shkel A. M. Compensation of Drifts in High-Q MEMS Gyroscopes Using Temperature Self-Sensing, Sensors & Actuators // A. Physical. 2013. Vol. 201. Pp. 517–524.
5. Gulmammadov F. Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial

sensors // 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. 2009. Pp. 591–596.

6. *Евстафьев С. Д., Ракитянский О. И., Северов Л. А., Семенов А. А.* Калибровка информационных характеристик микромеханического гироскопа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 167–172.

7. *Ломакин М. А.* Особенности построения модели погрешности микроэлектромеханических датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона. 2014. Т. 29. № 2. С. 2–7.

Поступила 29.11.18

Крылов Алексей Анатольевич – инженер-программист 1-й категории Акционерного общества «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», аспирант кафедры 305 «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва. Область научных интересов: испытания и калибровка навигационных приборов, МЭМС-гироскопы и акселерометры, разработка автоматизированных систем.

Кузнецов Павел Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 130 Акционерного общества «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», г. Москва. Область научных интересов: испытания и калибровка навигационных приборов, МЭМС-гироскопы и акселерометры, механические и термодинамические свойства МЭМС-датчиков.

MEMS gyroscope zero drift elimination at different temperature dynamics

The paper describes the physical causes of zero drift and its dependence on temperature. To reveal the temperature dependence of the drift at different heating dynamics, experiments were carried out with different switching intervals. The correlations between the drift and temperature are studied for different switching intervals at a number of significant time points from the switching. A method of drift compensation at different heating dynamics is proposed, which determines the interval closest to the current temperature dynamics.

Keywords: IMU calibration, zero drift of MEMS gyroscopes, Lagrange polynomials.

Krylov Aleksey Anatolievich – software engineer of the 1st category, Joint-Stock Company State Research Institute for Instrument Engineering, post-graduate student, Department 305 Automated complexes of orientation and navigation systems, Moscow Aviation Institute, Moscow.

Science research interests: testing and calibration of navigation devices, MEMS-gyroscopes and accelerometers, development of automated systems.

Kuznetsov Pavel Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Department 130, Joint-Stock Company State Research Institute for Instrument Engineering, Moscow.

Science research interests: testing and calibration of navigation devices, MEMS gyroscopes and accelerometers, mechanical and thermodynamic properties of MEMS sensors.