

УДК 681.2.088

Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС гироскопов в составе гироскопического блока

Крылов А.А.*, Корниук Д.В.**

*Государственный научно-исследовательский институт приборостроения,
проспект Мира, 125, Москва, 129226, Россия*

**e-mail: akril91@rambler.ru*

***e-mail: Dmitry6170@mail.ru*

Аннотация

В работе описаны физические особенности происхождения смещения нуля. Представлен способ разделения смещения нуля МЭМС на составляющие. Приведен обзор известных способов компенсации дрейфа нуля микромеханических гироскопов. Описан алгоритм аппроксимации дрейфа нуля кусочно-линейными функциями. Рассмотрен способ автоматического нахождения точек для этих функций.

Ключевые слова: микромеханические гироскопы, калибровка гироскопических блоков, дрейф нуля, смещение нуля.

Введение

Применение микромеханических датчиков движения в бортовой аппаратуре систем управления летательных аппаратов выгодно с точки зрения уменьшения

массогабаритных характеристик и снижения стоимости. Погрешности МЭМС датчиков известны и систематизированы [1], существует возможность алгоритмически компенсировать их недостатки. Это позволит применять такие датчики для решения ряда задач, в которых в настоящее время применяются гироскопы более высокого класса точности по сравнению с МЭМС гироскопами.

Возможности вычислительных средств бортовой аппаратуры позволяют корректировать показания датчиков, учитывая и компенсируя систематические погрешности в реальном масштабе времени. Систематические погрешности могут быть вызваны параметрами электронных компонентов, неточностью установки, физическими свойствами датчиков. Одной из таких погрешностей является смещение нуля МЭМС гироскопа.

Целью работы является разработка технологии определения и устранения смещения нуля МЭМС датчика угловой скорости (ДУС) в составе гиринерциального блока (ГИБ). Уменьшение смещения нуля происходит за счет корректировки, производимой в реальном времени. Корректировка производится путем вычитания поправочных значений, равных значению аппроксимирующей функции. Разработан способ построения этой функции, а также автоматический расчет её коэффициентов на основе данных, полученных в ходе испытаний.

Описание ГИБ

ГИБ (рисунок 1) - гиринерциальный блок, в котором реализованы три преобразовательных канала угловой скорости, обеспечивающие измерение

проекций угловой скорости на взаимно ортогональных осях приборной системы координат, связанной с корпусом блока. ГИБ построен в виде моноблочного корпуса, в котором установлено три МЭМС гироскопа (ДУС), в каждом из которых расположены микромеханические чувствительные элементы преобразователей угловой скорости. В состав ГИБ также входят платы источника вторичного электропитания и интерфейсов и микроконтроллера.



Рисунок 1. Гироинерциальный блок (ГИБ).

Программируемый микроконтроллер Миландр1986ВЕ92У позволяет корректировать показания МЭМС гироскопов с учетом вычисленных систематических погрешностей и обеспечивает выдачу информации в требуемом формате. В памяти микроконтроллера сохраняются программа и калибровочные данные, которые могут быть многократно перезаписаны в процессе калибровки изделия.

ГИБ настроен на выдачу информации с частотой 1000 Гц. Рабочий диапазон измеряемых угловых скоростей прибора $\pm 500^\circ/\text{с}$ [2].

Физическое происхождение, определение и особенности смещения нуля.

Чувствительные элементы МЭМС-гироскопов представляют собой сложную трехслойную структуру и имеют температурную зависимость своих параметров. Это, прежде всего, связано с тем, что измерительные зазоры в конденсаторах, выполненных из кремния, составляют значения 2-3 мкм, а регистрируемые минимальные перемещения имеют значения менее нанометра. При столь малых значениях и сложности микромеханической структуры даже применение дифференциальных методов измерений не позволяет исключить влияние температуры.

Вообще температурной зависимостью обладает не только микромеханический элемент, но и электроника, обрабатывающая сигнал с емкостных датчиков и управляющая работой гироскопа. Кроме того, очень сильно могут повлиять градиенты температуры [3] (неравномерное изменение температуры для разных частей).

МЭМС-датчики, используемые в ГИБ, разработаны в АО ГИРООПТИКА по технологии “кремний на стекле”, являющейся разновидностью технологии “кремний на изоляторе” [4]. В используемой конструкции МЭМС-гироскопа датчик температуры находится непосредственно в кристалле микросхемы, которая установлена на дне теплопроводящего металлокерамического корпуса, через

который осуществляется тепловая связь с капсулированным микромеханическим элементом. Так как микросхема обработки при своей работе выделяет значительно больше тепла чем микромеханический элемент, то в первые секунды после включения показания датчика будут соответствовать температуре кристалла микросхемы.

Эти изменения приводят к отклонению значений собственных частот колебаний чувствительных элементов [5] и, как следствие, изменению значений тока на выходе. Поэтому датчики имеют погрешности, зависящие от температуры, особенно проявляющиеся в первые минуты после включения. Одной из этих погрешностей является смещение нуля.

Смещение (и как частное проявление, дрейф нуля) нуля – одна из основных калибруемых погрешностей блоков датчиков наряду с неортогональностью и нелинейностью масштабного коэффициента и зависимостью от перегрузки [6].

Смещение нуля датчика – отклонение показания датчика от нулевого положения при отсутствии измеряемого воздействия. Смещение нуля может быть разложено на составные части, имеющие как систематический, так и случайный характер. К случайным погрешностям смещения стоит отнести случайность смещения при включении. К систематическим составляющим можно отнести смещение, зависящее от температуры и дрейф нулевого сигнала после включения.

Особенностями требований к ГИБ являются предполагаемое время работы прибора – 2 минуты, а также работа с 3-ей секунды после включения, что при условии неподвижного состояния позволяет произвести начальную выставку

датчиков. Начальная выставка заключается в компенсации начального смещения нуля, вызванного как случайностью смещения при включении, так и зависимостью от температуры. Обычно компенсация заключается в вычитании среднего арифметического сигнала от 1.5 до 2 секунд. При условии компенсации начального смещения и исходя из вышеобозначенных условий, а также предположения, что за время работы прибора его температура резко не изменится, можно сделать вывод, что основным источником смещения нуля будет дрейф на начальной температуре.

В общем случае дрейф смещения нуля датчика – изменение смещения нуля, зависящее от времени, вызванное внутренними свойствами датчика и внешними воздействующими факторами.

Физически причиной возникновения дрейфа нуля микромеханических гироскопов является изменение давления вакуума внутри капсулы МЭМС при изменении температуры [7], а также изменение размеров кремниевых элементов из-за тепловой деформации [8]. Этими факторами обусловлено изменение собственной частоты гироскопов и, как следствие, их выходных показаний [1], [9].

Применяемые в ГИБ МЭМС-датчики проходят предварительную настройку на этапе изготовления в АО ГИРООПТИКА с учетом теории дрейфа гироскопов [10], [11].

Смещение нуля ГИБ

В процессе исследования функционирования микромеханических ДУС в составе ГИБ была установлена явно выраженная зависимость смещения нулевого

сигнала от температуры, измеряемой датчиком температуры, интегрированным в микросхему управления, расположенную в корпусе ДУС (рисунок 2). Похожая картина была получена в работах [12], [13].

$dr1xG1$ – усредненный сигнал гироскопа после включения.

$Tx1$ – сигнал температурного датчика после включения.

Fn - частота выдачи информации прибора.

i – количество точек.

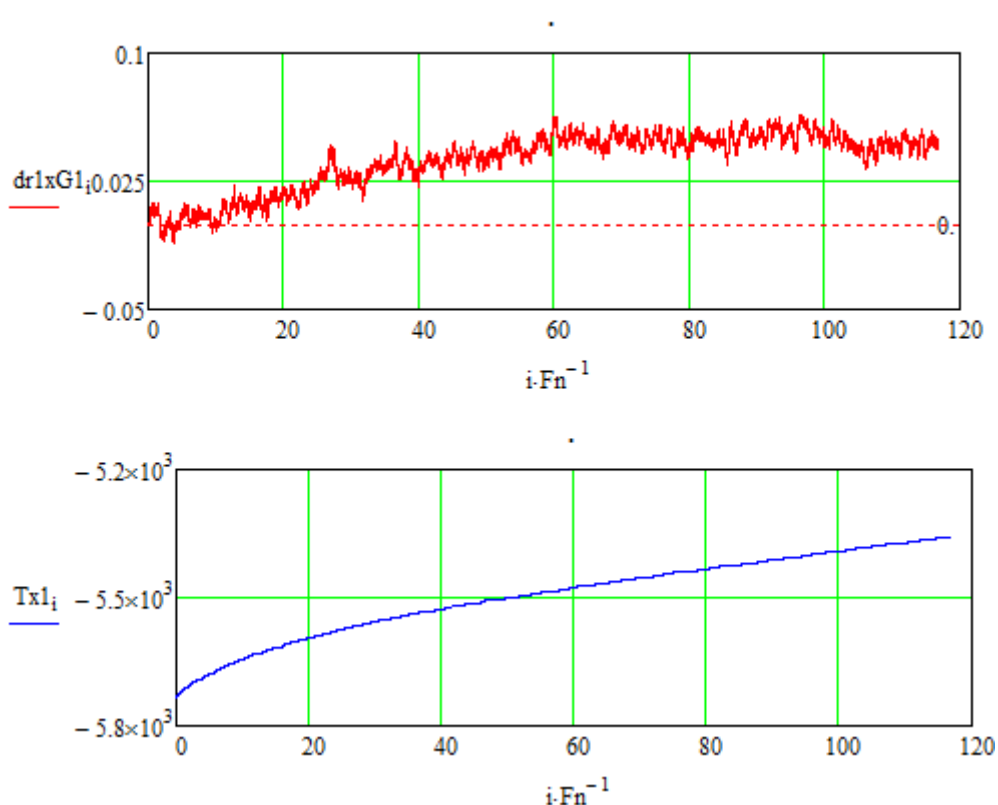


Рисунок 2. Зависимость смещения нуля от температуры.

Особенно характерно это проявляется в течение первых 2-5 минут после включения прибора, когда внутренняя конструкция прибора начинает достаточно резко нагреваться. Величина дрейфа при каждом следующем включении зависит от времени, прошедшего с момента последнего выключения прибора (то есть, от того,

насколько конструкция успела остыть). Поэтому важно исследовать дрейф не по одному включению, а по нескольким, так, чтобы их можно было считать независимыми (внутренняя конструкция успела остыть) с промежутком между включениями не менее 5 минут [14]. В зависимости от задачи можно выбрать любой временной отрезок, на котором будет происходить компенсация дрейфа. Для наших целей мы используем отрезок длиной 120 секунд от включения прибора.

Дрейф каждого датчика меняется в зависимости от температуры внешней среды. Для получения полной картины изменения дрейфа следует проводить измерения на температурных точках по всему диапазону с шагом не более 10°C . На одной температуре обычно записываются данные по 5 включениям (рисунок 3).

$dr1xG1$, $dr1xG2$, $dr1xG3$, $dr1xG4$, $dr1xG5$ – графики по 5 включениям.

$Gkscp$ – график среднего значения по пяти включениями.

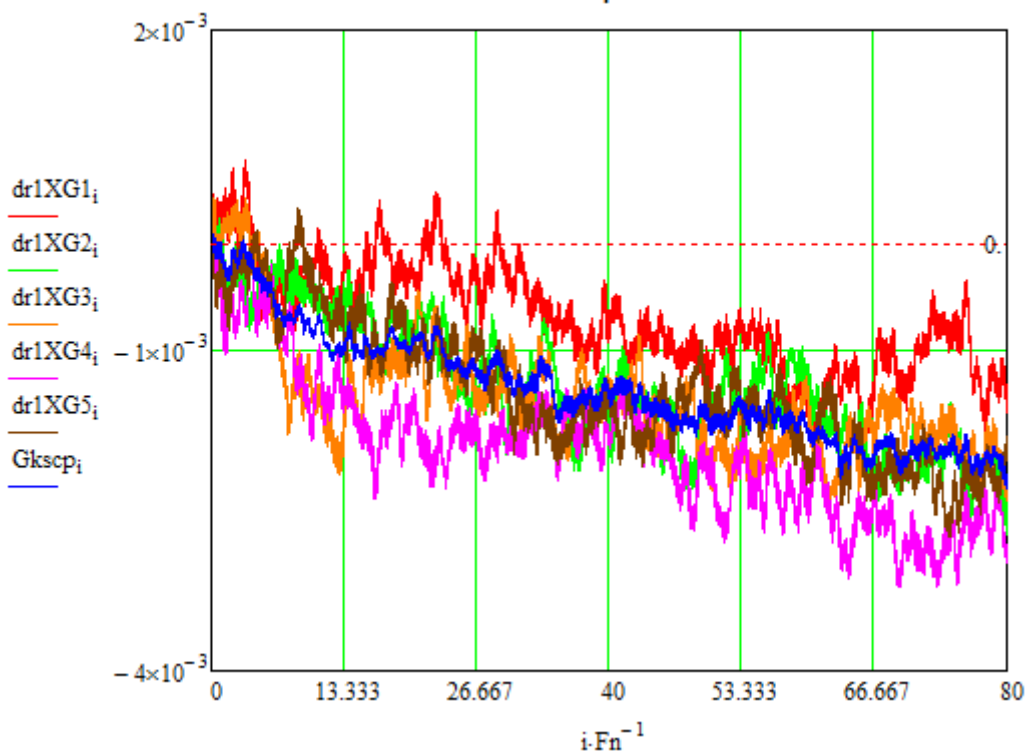


Рисунок 3. Графики дрейфа 5 включений и усредненного дрейфа (синяя линия).

Анализ имеющихся технологических подходов к устранению дрейфа.

Ряд зарубежных публикаций предполагает использование температурного параметра в фильтре Калмана, однако детали его применения не раскрываются [15], [16]. Наиболее популярным способом устранения температурного дрейфа является применение полинома с коэффициентами, вычисляемыми по методу наименьших квадратов [17], [18]. Обычно используются полиномы 3-4 степеней. [17], [19]. Применение такого способа удобно в плане простоты расчетов и небольшого количества сохраняемых коэффициентов. Однако он плохо работает на кривых с большим количеством точек перегиба, либо с кривыми, имеющими резкие перегибы. Увеличение степени полинома значительно усложняет расчеты и не всегда дает желаемую точность. Поэтому имеет смысл обратить внимание на другие алгоритмы. Например, алгоритм точечной аппроксимации.

Алгоритм компенсации температурного дрейфа.

Для снижения влияния случайных отклонений рассчитывается файл со средними арифметическими значениями из пяти файлов на данной температуре. Дальнейшие вычисления производятся на основе этого файла.

Картина дрейфа меняется в зависимости от температуры. Для компенсации используется алгоритм кусочно-линейной аппроксимации (рисунок 4). $gI-$

исходный усредненный сигнал, gk – аппроксимирующая функция, k – количество точек после усреднения.

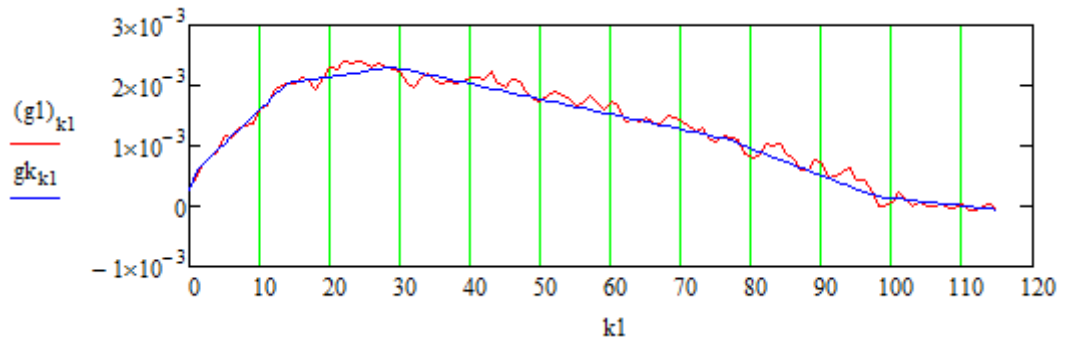


Рисунок 4. График дрейфа и функции аппроксимации

В пределах ожидаемого времени работы на оси времени выбирается некоторое число точек t_i (образующих углы, имеющие наименьший угол перегиба). Вычисляется коэффициент между двумя соседними точками, зависящий от изменения температуры:

$$d_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{St_i} \quad (1),$$

где S_i - значение в точке t_i ,

$$St_i = \sum_{y=t_i * Fn}^{t_{i+1} * Fn} delT_y \quad (2),$$

где

$$delT_j = T_j - T_{j-1} \quad (3)$$

– разность температур между соседними точками.

$$j = 0 \dots n \quad (4),$$

где n – количество измерений,

Fn – частота выдачи информации прибора.

Коэффициенты высчитываются для каждого $i = 0 \dots m$, где m – количество точек компенсации.

Работа алгоритма заключается в том, что при включении при достижении времени начала работы запоминается текущее значение температуры, относительно которого вычисляются временные точки и коэффициенты. Если текущая температура находится между двумя температурами, на которых были вычислены точки и коэффициенты, то текущие значения коэффициентов будут рассчитываться пропорционально положению текущей температуры между двумя вычисленными (рисунок 5). Способ применения коэффициентов между температурами похож на интерполяцию полиномами Лагранжа в работе [20].

M_6, M_7 – графики дрейфа двух соседних температур.

g_6, g_7 – графики усредненных значений дрейфа двух соседних температур.

g_q – график дрейфа для температуры между двумя температурами, для которых производились измерения.

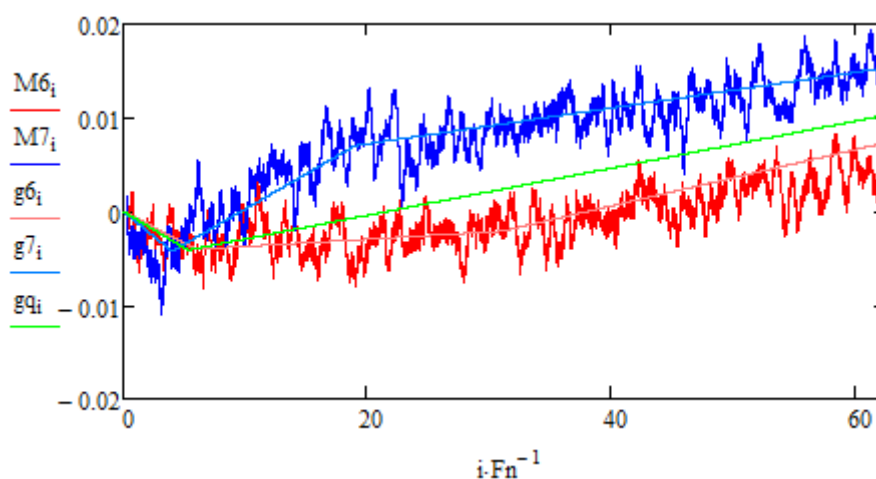


Рисунок 5. Пример работы алгоритма на произвольной температуре между двумя температурами, для которых производились измерения.

Алгоритм поиска точек

Выбираем количество точек для усреднения sh . Общее количество точек данных k делится на sh , частное $\frac{k}{sh}$ – количество усредненных точек (рисунок 6). g_{i8} – исходный усредненный сигнал по нескольким измерениям, $g3$ – усреднение сигнала g_{i8} по sh .

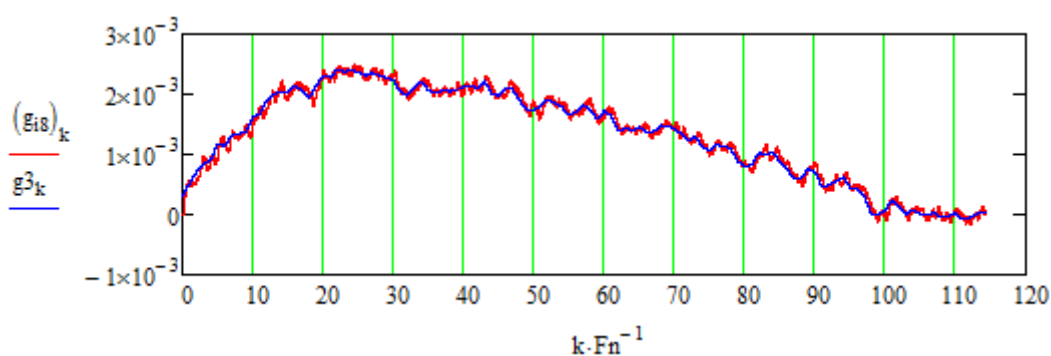


Рисунок 6. Изначальный график данных (красный) и усредненный (синий)

Из трех любых последовательно взятых точек можно построить треугольник, причем угол у средней вершины будет углом, определяющим изменение направления дрейфа (рисунок 7). Основная идея заключается в том, чтобы отмечать те точки, в которых угол будет наименьшим. По этим точкам можно составить график, наиболее точно описывающий основные точки перегиба. Для корректной работы алгоритма необходимо выбрать достаточно большой sh для фильтрации низкочастотных колебаний. Обычно sh принимается равным 1000, что соответствует частоте прибора. По причине ограниченного объема памяти микроконтроллера, количество точек для калибровки следует ограничить определенным числом tp . При проходе через все точки можно найти количество

углов γ , меньших заданного α . Для соответствия необходимому числу точек угол можно динамически корректировать, поразрядно прибавляя/отнимая некоторое значение до достижения необходимого количества.

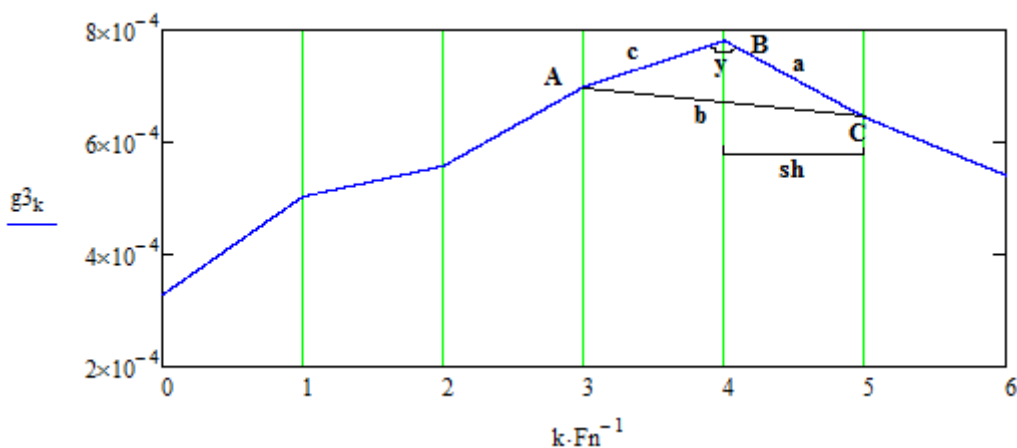


Рисунок 7. Нахождение угла между точками усредненного массива

Формула нахождения угла γ :

$$\cos \gamma = \frac{-b^2 + a^2 + c^2}{2ac}, \quad (5).$$

Расстояния между точками (A,B и C) вычисляются по формулам:

$$a = \sqrt{(y_B - y_C)^2 + (shl)^2}, \quad (6),$$

$$b = \sqrt{(y_A - y_C)^2 + (2shl)^2}, \quad (7),$$

$$c = \sqrt{(y_B - y_A)^2 + (shl)^2}, \quad (8).$$

где $shl = sh * l$, l – динамически подстраиваемая величина, зависящая от ординат точек $y_B - y_A$. Она используется для приближения величин катетов и, как следствие, получения более интуитивно понятных углов.

Заключение

Результат применения данного алгоритма с учетом коэффициентов, вычисленных по описанной выше методике, приведен в таблице 1, для сравнения приведены результаты аппроксимацией полиномом.

Таблица 1. Значения смещения нуля без коррекции, с коррекцией полиномом и коррекцией кусочно-линейной аппроксимацией.

| Прибор | Ось | Без коррекции | С коррекцией полиномом | С коррекцией кусочно-линейной аппроксимацией |
|--------|-----|---------------|-------------------------|--|
| 1 | X | 0.01982 | $1.02205 \cdot 10^{-2}$ | $6.56946 \cdot 10^{-3}$ |
| | Y | 0.04490 | $1.38459 \cdot 10^{-2}$ | $8.79572 \cdot 10^{-3}$ |
| | Z | 0.0275 | $0.81714 \cdot 10^{-2}$ | $5.01691 \cdot 10^{-3}$ |
| 2 | X | 0.10237 | $1.32963 \cdot 10^{-2}$ | $6.19962 \cdot 10^{-3}$ |
| | Y | 0.09769 | $1.28843 \cdot 10^{-2}$ | $7.5035 \cdot 10^{-3}$ |
| | Z | 0.05452 | $1.05296 \cdot 10^{-2}$ | $5.87915 \cdot 10^{-3}$ |

Приведенный алгоритм позволяет в 5-20 раз уменьшить значение дрейфа нуля по сравнению со значениями без компенсации. По сравнению с полиномиальной аппроксимацией 3-4 степени значение дрейфа при кусочно-линейной аппроксимации получилось меньше в 2-3 раза.

Библиографический список.

1. Вторушин С.Е., Аршинова А.А., Нестеренко Т.Г. Температурный дрейф собственных частот микромеханического гироскопа // Вестник науки Сибири. 2014. № 1(11). С. 3 - 5.
2. Корниюк Д.В., Крылов А.А. Технологические подходы к устранению нелинейности масштабного коэффициента при настройке МЭМС гироскопов // «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Тезисы докладов. (Москва, 14-18 ноября 2016) - М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 315 - 317.
3. Fontanella R., Accardo D., Caricati E., Cimmino S., De Simone D. An Extensive Analysis for the Use of Back Propagation Neural Networks to Perform the Calibration of MEMS Gyro Bias Thermal Drift // IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS 2016), 11 - 14 April 2016, pp. 672 - 680.
4. Попова И.В., Лестев А.М., Семенов А.А., Иванов В.А., Ракитянский О.И., Бурцев В.А. Капсулированные микромеханические гироскопы и акселерометры для систем навигации и управления // Гироскопия и навигация. 2008. № 3(62). С. 27 - 36.
5. 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.
6. Веремеенко К.К., Галай И.А. Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде // Труды МАИ. 2013. № 63. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36139>

7. Krijnen B., Brouwer D.M., Abelman L., Herder J.L. Vacuum behavior and control of a MEMS stage with integrated thermal displacement sensor // *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2016, doi: [10.1016/j.sna.2015.09.005](https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.09.005).
8. E.J. Ng, Vu A. Hong, Y. Yang, C. Hyuck Ahn, Camille L.M. Everhart, and Thomas W. Kenny. Temperature Dependence of the Elastic Constants of Doped Silicon // *Journal of microelectromechanical systems*, June 2015, vol. 24, no. 3, pp. 730 - 741.
9. Лысенко И.Е. Влияние температурных и технологических погрешностей на динамику трехосевого микромеханического гироскопа // *Гироскопия и навигация*. 2006. № 2(53). С. 91 – 92.
10. Джашизов В.Э., Панкратов В.М., Лестев А.М., Попова И.В. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов // *Микросистемная техника*. 2001. № 3. С. 2 - 10.
11. Барулина М.А., Джашизов В.Э. Автоматизированная система расчета динамических параметров микромеханических гироскопов // V конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». Сборник трудов. (Санкт-Петербург, 13 марта-30 октября 2003) – Спб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 71 - 79.
12. 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.

13. Gulmammadov F. Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors // 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009, doi:10.1109/rast.2009.5158260
14. Мишин А.Ю., Кирюшин Е.Ю., Обухов А.И., Гурлов Д.В. Малогабаритная комплексная навигационная система на микромеханических датчиках // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44533>
15. J. Du, C. Gerdman, M. Lindén. Signal Quality Improvement Algorithms for MEMS Gyroscope-Based Human Motion Analysis Systems: A Systematic Review // Sensors, 2018, vol. 18, issue 4, pp. 1123, doi: 10.3390/s18041123
16. Feng Y., Li X., Zhang X. An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter // Sensors, 2015, vol. 15(5), pp. 11222 – 11238, doi.org/10.3390/s150511222
17. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности микроэлектромеханических датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2 (29). С. 84.
18. Пазычев Д.Б. Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы, построенной на базе микромеханических чувствительных элементов // Наука и образование. 2011. № 1. С. 9 - 12.
19. Шаймарданов И.Х. Метод калибровки бесплатформенной инерциальной навигационной системы на микромеханических акселерометрах и гироскопах // XIII конференция молодых ученых “Навигация и управление движением” – М.: Изд-во Интернавигация, 2011. – 48 с.

20. Yang H., Zhou B., Wang L., Xing H., Zhang R. A Novel Tri-Axial MEMS Gyroscope Calibration Method over a Full Temperature Range // Sensors, 2018, vol. 18 (9), pp. 3004, doi.org/10.3390/s18093004