

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДРЕЙФА ВОГ

Рассматривается способ повышения точности измерений волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) в условиях нестационарной температуры. Построена математическая модель температурной зависимости дрейфа ВОГ. Приведены результаты анализа экспериментальных данных, моделирования. Делается вывод о высокой эффективности разработанной модели.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, температура, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

После распада СССР перед ракетно-космической отраслью Украины возникла задача разработки отечественных чувствительных элементов, в том числе измерителей угловой скорости, для систем управления (СУ) ракет-носителей и космических аппаратов. Традиционно в СУ объектов ракетно-космической техники использовались механические гироскопические измерители вектора угловой скорости российского производства. В новых условиях поддержание производства этих сложных дорогостоящих приборов оказалось проблематичным для России, тем более проблематично создание технологии их разработки для Украины. Одним из альтернативных решений данной проблемы явилось построение измерителей угловой скорости на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Сначала ВОГ применялись в системах управления среднего класса точности. Точность данного типа датчиков за 25 лет разработок существенно возросла. Если в начале 1990-х годов точность ВОГ была около $1^\circ/\text{ч}$ (1σ) [1], то современный уровень точности лучших образцов составляет: $0,0001 \div 0,0011^\circ/\text{ч}$ в США [2], $0,001 \div 0,01^\circ/\text{ч}$ – Евросоюз [3], $0,001 \div 0,01^\circ/\text{ч}$ – КНР [4], $0,005 \div 0,1^\circ/\text{ч}$ – Россия [5]. Достигнутый уровень точнос-

ти позволяет создавать на основе ВОГ системы ориентации для космических аппаратов [6] и прецизионные инерциальные навигационные системы [7].

Для эффективного использования в системах управления датчиков среднего класса точности требуется алгоритмическая компенсация ошибок их измерений. Возможность такой компенсации обусловлена тем фактом, что для большинства ВОГ имеет место повторяемая зависимость погрешности измерений от температуры и ее градиента. Такая зависимость или модель, строго говоря, является индивидуальной не только для данного типа ВОГ, но и для каждого экземпляра гироскопа. Выбор наилучшей модели и ее параметрическая идентификация составляют суть процедуры паспортизации датчика. Однако, для датчиков среднего класса точности на заводе-изготовителе такая процедура, как правило, не проводится. При этом в сопроводительной документации регламентируется величина суммарного дрейфа, включающая изменчивость дрейфа «от запуска к запуску» и изменение дрейфа в запуске. В этих условиях разработка методики паспортизации ВОГ, выбор и верификация модели температурно-зависимого дрейфа, результаты паспортизации для конкретных образцов ВОГ представляют определенный научный и практический

интерес. Результаты решения подобной задачи, изложенные, например, в [8], имеют ограниченное значение, поскольку не отражают зависимости дрейфа от градиента температуры, которая по результатам экспериментов для исследуемого типа ВОГ является доминирующей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать компенсирующую модель ошибок измерений ВОГ в зависимости от температурных параметров. Для этого следует разработать методику проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных; ввести критерии достоверности результатов аппроксимации, в соответствии с которыми выбрать математическую модель зависимости дрейфа ВОГ от температуры и ее изменения.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента использовалась термокамера, осуществляющая как нагрев, так и охлаждение ВОГ. Температура изменялась ступенчатым образом в диапазоне от 10°C до 30°C, характерном для предполагаемых штатных условий работы датчиков. Состав полученной информации включает измерения угловой скорости и измерения температуры датчика. Частота измерений (200 Гц) и длина временного ряда (около 12 часов) достаточны для осреднения измерений и понижения уровня нормально распределенной случайной составляющей измерений в точке каждого временного отсчета.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

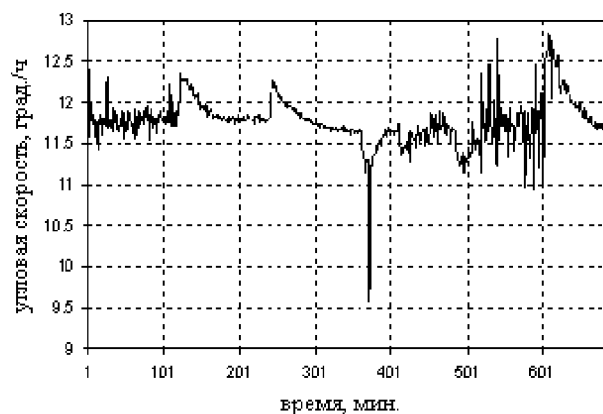
После осреднения на минутном интервале данные представляют собой временные ряды зависимостей измерений угловой скорости (рис. 1, а) и температуры от времени (рис. 1, б).

Предварительный анализ экспериментальных данных содержит следующие процедуры:

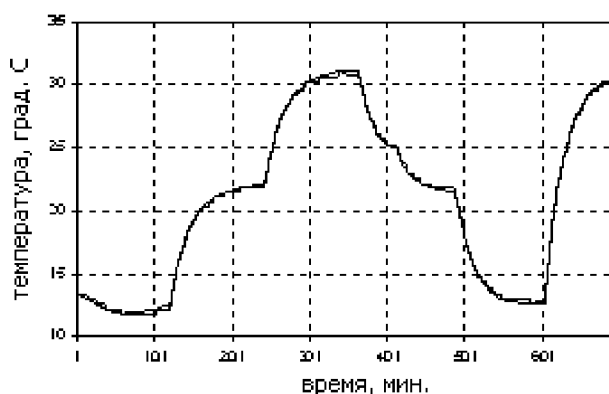
- осреднение измерений на минутном интервале;
- сглаживание графика измерений температуры;
- оценка градиента температуры по сглаженной зависимости самой температуры;
- исключение аномальных измерений на основе проверок на диапазон и гладкость и визуального анализа данных (рис. 2).

Последующий анализ проводится по результатам предварительного и включает в себя:

- применение рекуррентного метода наименьших квадратов (МНК) для оценки параметров введенной модели;
- вычисление статистических характеристик (среднего, СКО) погрешности аппроксимации;
- визуальный анализ качества аппроксимации экспериментальных данных;
- анализ поведения оценок параметров введенной модели в зависимости от увеличения числа используемых измерений (стабилизация оценки);
- выбор наилучшей математической модели для данного образца гироскопа по критериям статистической значимости ее параметров, стабилизации их оценки, качеству аппроксимации, величинам статистических характеристик.



а)



б)

Рис. 1. Графическое представление первичных данных: а) измерения угловой скорости; б) измерения температуры

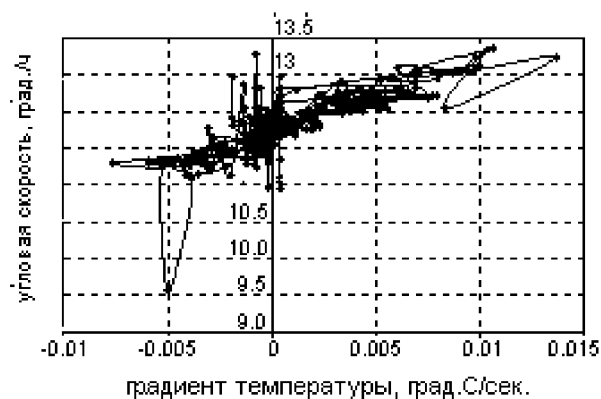


Рис. 2. Зависимость измерений угловой скорости от градиента температуры

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВОГ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предварительный анализ экспериментальных данных позволил предположить сложный характер зависимости измерений ВОГ от температуры и ее градиента, поэтому в ее математическую модель первоначально, кроме систематической составляющей, включены три группы слагаемых, зависящие от температуры, градиента температуры и их произведения. Исходная математическая

модель зависимости измерений от температурных параметров задается в виде

$$\begin{aligned}\Omega(\tau, \Delta\tau) = & K_{00} + K_{10} \cdot \tau + K_{20} \cdot \tau^2 + K_{30} \cdot \tau^3 + \\ & + K_{01} \cdot \Delta\tau + K_{02} \cdot \Delta\tau^2 + K_{03} \cdot \Delta\tau^3 + \\ & + K_{11} \cdot \tau \cdot \Delta\tau + K_{21} \cdot \tau^2 \cdot \Delta\tau + K_{31} \cdot \tau^3 \cdot \Delta\tau.\end{aligned}\quad (1)$$

По осредненным значениям измерений составляется избыточная система уравнений вида (1), в которой переменные Ω , τ , $\Delta\tau$ принимают соответственно значения Ω_n , τ_n , $\Delta\tau_n$, $n = \overline{1, N}$. Неизвестные коэффициенты вычисляются по рекуррентному методу наименьших квадратов. В формуле (1) $\tau_n = \frac{(T_n - T_0)}{10}$, $\Delta\tau_n = \frac{\Delta T_n}{0,01}$ – переменные, область изменения которых в эксперименте близка к ± 1 ; T_n , ΔT_n – текущие измерения температуры прибора и оценка ее градиента в $^{\circ}\text{C}$ и $^{\circ}\text{C}/\text{c}$ соответственно; $n = \overline{1, N}$ – номер осредненного измерения, N – количество осредненных измерений, $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ – номинальное значение температуры. Здесь учтено, что температура в эксперименте менялась на $\pm 10^{\circ}\text{C}$ относительно номинального значения, градиент на $\pm 0,01^{\circ}\text{C}/\text{c}$, а в качестве номинального значения градиента принято $0^{\circ}\text{C}/\text{c}$; K_{00} , K_{10} , K_{20} , K_{30} , K_{01} , K_{02} , K_{03} , K_{11} , K_{21} , K_{31} – неизвестные параметры модели.

В процессе увеличения объема используемых данных не все МНК оценки параметров модели (1) стабилизируются (рис. 3).

В то же время известно, что сходимость МНК оценки с ростом объема выборки свидетельствует о состоятельности полученной оценки, а критерием значимости отдельно взятого параметра модели является отношение вычисленной оценки параметра к его СКО (t -статистика). Таким образом, факт нестабильности хотя бы одной оценки свидетельствует о параметрической избыточности модели и может служить основанием для ее упрощения. В результате анализа упрощенных моделей установлено, что для всех четырех исследуемых экземпляров ВОГ наилучшей является модель вида

$$\Omega(\tau, \Delta\tau) = K_{00} + K_{10}\tau + K_{01}\Delta\tau + K_{11}\tau\Delta\tau, \quad (2)$$

численные значения коэффициентов которой для различных приборов приведены в табл. 1.

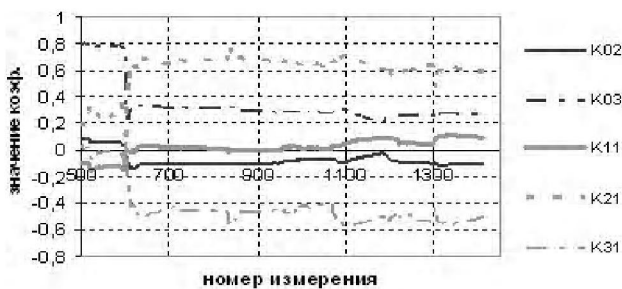


Рис. 3. Динамика оценок параметров модели (1)

Сходимость оценок параметров достаточно хорошая (рис. 4).

Адекватность аппроксимации экспериментальных данных с помощью модели (2) можно оценить визуально (рис. 5 и 1, а).

Погрешность аппроксимации для различных приборов приведена в табл. 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов компенсирующей модели

№ ВОГ	Значения коэффициентов, град/ч			
	K_{00}	K_{10}	K_{01}	K_{11}
1	11,739	-0,063	0,949	0,02
2	11,508	0,065	-1,199	0,06
3	11,503	0,038	-0,883	0,057
4	11,511	0,021	0,071	-0,07

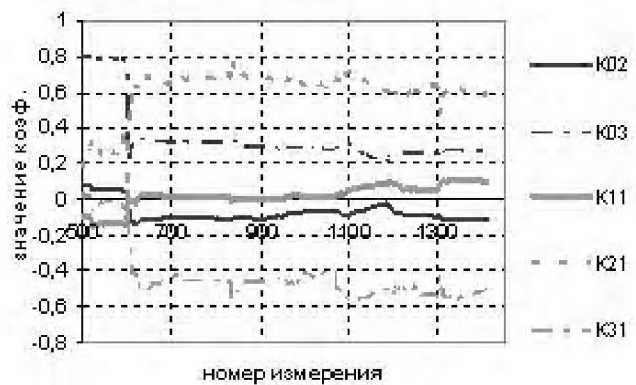


Рис. 4. Динамика оценок параметров модели (2)

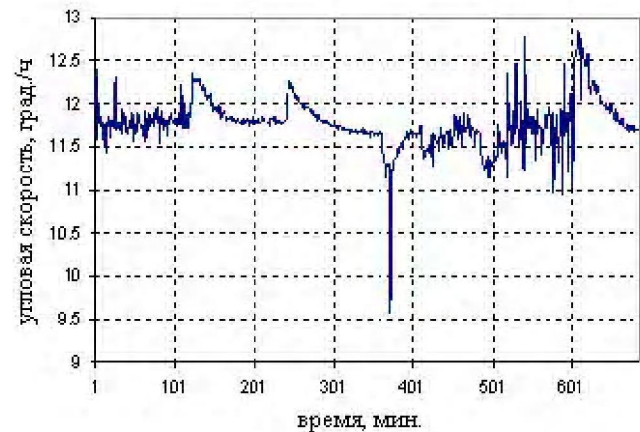


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных измерений моделью (2)

Таблица 2. Эффективность аппроксимации коэффициентов компенсирующей модели

№ ВОГ	Значение критерия, град/ч	
	Средняя ошибка аппроксимации	СКО ошибки аппроксимации
1	$6 \cdot 10^{-13}$	0,115
2	$-3 \cdot 10^{-13}$	0,111
3	$2 \cdot 10^{-13}$	0,107
4	$-5 \cdot 10^{-11}$	0,225

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментов с четырьмя ВОГ серии ОИУС501 (производства ООО НПК «Оптолинк», Россия) исследована их чувствительность к изменению температурных параметров. Для всех рассмотренных образцов выявлена существенная зависимость от градиента температуры и незначительная зависимость от значения самой температуры.

По результатам аппроксимации анализа сходимости в качестве наилучшей для всех четырех экземпляров выбрана компенсирующая модель ошибок измерений следующей структуры

$$\Omega^* = \Omega - (K_{00} - \Omega_{\text{Эталон}}) - K_{10} \cdot \tau - K_{01} \cdot \Delta\tau - K_{11} \tau \Delta\tau, \quad (3)$$

где Ω – измеренное значение угловой скорости, $\Omega_{\text{Эталон}}$ – эталонное значение проекции вектора угловой скорости на ось чувствительности в месте проведения эксперимента (11,498°/ч); Ω^* – значение измерения угловой скорости после компенсации; τ – безразмерная относительная температура, $\Delta\tau$ – безразмерный градиент температуры. Определены численные значения коэффициентов модели для каждого экземпляра датчика (табл. 1).

Областью использования такой модели являются изменение температуры от +10°C до +30°C и градиента температуры ΔT от –0,01°C/сек до +0,01°C/сек.

Использование алгоритма компенсации (3) уменьшает изменчивость дрейфа ВОГ в запуске, вызванную температурными режимами эксперимента, с величины 2 град/ч до уровня 0,05 град/ч. Данный результат свидетельствует о целесообразности проведения паспортизации температурной зависимости дрейфа ВОГ среднего класса точности с целью последующей компенсации влияния температуры и ее градиента на точность измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barbour, N. Inertial Instruments: Where to Now? / N. Barbour, J. Elwell, R. Setterlund // Proc. of the AIAA GNC Conference, Hilton Head, SC, 10–12 August 1992. Paper AIAA-92-4414-CP. – P. 566–574.
2. High Performance Fiber Optic Gyro-based Inertial Reference System // доступно на официальном сайте компании «Honeywell» URL – www.honeywell.com/News/. Дата обращения 16.04.2012 г.
3. Astrix 200 FOG. A Very High Performance FOG IMU for Accuracy demanding Satellites // URL – www.Astrum.cads.net (дата обращения 13.04.2012 г.).
4. Yang, Y. High precision FOG based on Er-doped superfluorescent fiber source / Y. Yang, Z. Wang, X. Yi, W. Zhang // J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2005. – No. 11. // URL – www.ilab.cn/A-bjhkhtdxxb200511001.html. Дата обращения 13.04.2012 г.
5. Официальный сайт российской компании ООО НПК «Оптолинк» // URL – www.optolink.ru. Дата обращения 13.04.2012 г.
6. Оценка точности калибровки погрешностей блока волоконно-оптических гироскопов бесплатформенной астроинерциальной системы ориентации / С. А. Бутырин, А. Ф. Дюмин, В. В. Корабельщиков [та ін.] // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 4 (47). – С. 74.

7. Наполитано Ф. Первая прецизионная инерциальная навигационная система на волоконно-оптических гироскопах / Ф. Наполитано, Т. Гейф, Й. Коттро [та ін.] // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 4 (39). – С. 101–114.
8. Успехи в разработке бесплатформенных инерциальных навигационных систем на базе волоконно-оптических гироскопов / А. П. Колеватов, С. Г. Николаев, А. Г. Андреев [и др.] // XVI С-Пб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – С. Пб. : ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2009. – С. 13–20.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2012.

Кузнецов Ю. О., Олейник С. В., Успенский В. Б., Хацько Н. Є. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДРЕЙФА ВОГ

Розглянуто спосіб підвищення точності вимірів волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) в умовах нестационарної температури. Побудована математична модель температурної залежності дрейфу ВОГ. Приведені результати аналізу експериментальних даних, моделювання. Зроблено висновки про високу ефективність використаної моделі.

Ключові слова: волоконно-оптичний гіроскоп, температура, математична модель.

Kuznetsov D. Y., Oleynik S., Uspensky D. V., Khatsko N. INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DRIFT OF FOG

The way to improve the accuracy of measurements of fiber-optic gyroscope (FOG) OIUS501 production of Russian company «Optolink» is examined. The studies were conducted to assess the use of these sensors to control the orientation of the satellite. The experiment was carried in a heat chamber in rising and lowering the temperature in given (selected) range. The experimental data were subjected to the averaging and smoothing. Several mathematical models depending on the temperature drift of the FOG and the rate of temperature change are proposed. To assess the quality of the approximation the criterion of a minimum average error of measurements approximation and the criterion of minimum root-mean-square deviation of approximation error are used. In result the model was selected, which allows to reduce the variability of the drift of FOG in the launch from the values 2°deg / h to the level of 0,05 deg / h.

Key words: fiber-optic gyroscope, temperature, mathematical model of measuring.

REFERENCES

1. Barbour N., Elwell J., Setterlund R. Inertial Instruments: Where to Now? *Proc. of the AIAA GNC Conference, Hilton Head, SC, 10-12 August 1992*. Paper AIAA-92-4414-CP. – pp. 566–574.
2. High Performance Fiber Optic Gyro-based Inertial Reference System // доступно на официальном сайте компании «Honeywell» URL – www.honeywell.com/News/.
3. Astrix 200 FOG. A Very High Performance FOG IMU for Accuracy demanding Satellites // URL – www.Astrum.cads.net.
4. Yang Y., Wang Z., Yi X., Zhang W. High precision FOG based on Er-doped superfluorescent fiber source, *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, No. 11., URL, www.ilab.cn/A-bjhkhtdxxb200511001.html. Дата обращения 13.04.2012 г.
5. Research & Production Company «Optolink», URL, <http://www.optolink.ru/en>

6. Butyrin S. A., Domin A. F., Korabel'sheikov V. V., Surinskij D. M. Otsenka tochnosti kalibrovki pogreshnostej bloka volokonno-opticheskikh giroskopov besplatformennoj astroinercialnoj sistemy orientatsii, *Giroskopiya i navigaciya*, 2004, № 4(47), P. 74.
7. Napolitano F., Gef T., Kottro J., Lore T. Pervaya precizionnaya inercialnaya navigacionnaya sistema na volokonno-opticheskikh giroskopah, *Giroskopiya i navigaciya*, 2002, № 4(39), pp. 101–114.
8. Kolevatov A. P., Nikolaev S. G., Andreev A. G., V. S. Ermakov, Struk V. K., Parphenov A. S., Nesterov I. I. Uspеhi v razrabotke besplatformennykh inercialnykh navigacionnykh system na baze volokonno-opticheskikh giroskopov XVI SPb., *Mezhdunarodnaya konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam*. S.Pb.: GNC RF CNII «Ėlektropribor», 2009, pp. 13–20.