УДК 681.5.08

Д.В. Павлов

Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кратко описана математическая модель волоконно-оптического гироскопа VG910Q. Для разработки эффективной математической модели используется среда Simulink, входящая в состав MatLab. В имитационном моделировании используются виртуальные модули и устройства, поведенческая модель которых максимально приближена к реальной физической модели.

Ключевые слова: имитационная модель, волоконно-оптический гироскоп, стабилизация.

D.V. Pavlov

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
Velikii Novgorod, Russian Federation

MATHEMATICAL MODEL OF A FIBER-OPTICAL GYROSCOPE FOR STATIC SYSTEM

In this work the mathematical model of a fiber-optical gyroscope of VG910Q is briefly described. For development of effective mathematical model the Simulink environment which is a part of MatLab is used. In imitating modeling virtual modules and devices which behavioural model is most approached to real physical model are used.

Keywords: imitating model, fiber-optical gyroscope, stabilization.

В оптико-электронных системах слежения и наведения, использующихся на борту истребителей, требуется стабилизация визирной оси. Для повышения точности стабилизации необходимо усовершенствование модуля, который выполняет задачу стабилизации. Модернизация данного модуля может заключаться:

- в изменении элементной базы изделия;
- усовершенствовании программно-алгоритмического обеспечения.

Изменение элементной базы приведет к изменению габаритов модуля. Однако изменять габаритные характеристики и элементную

базу модуля не всегда представляется возможным из-за жестких требований к массо-габаритным характеристикам. Поэтому повышения точности стабилизации визирной оси можно достичь путем усовершенствования алгоритмов. В частности, точный учет поведенческой модели датчиков, входящих в состав модуля стабилизации, позволяет построить математическую модель. Эта модель позволит учесть возможные погрешности датчиков, тем самым скорректировать их.

В данной статье изучается инерциальный измерительный модуль (ИИМ), который входит в состав системы гиростабилизации бортового оборудования оптико-электронного прибора (ОЭП). ОЭП представляет собой бортовое устройство военного истребителя СУ-35. Блок-схема ИИМ представлена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема ИИМ с вычислительным устройством (ВУ)

ИИМ представляет собой устройство, состоящее из трех отдельных подмодулей. Основные элементы: акселерометр – датчик линейного ускорения (ДЛУ), волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), цифровой датчик температуры (T , °C). В процессорную часть схемы ИИМ входит ПЛИС Altera Cyclone III. ВУ используется как отдельное устройство, на котором выполняются все вычислительные операции с плавающей запятой.

В данной работе кратко описана математическая модель [1] волоконно-оптического гироскопа VG910Q, который используется в ИИМ. Для разработки эффективной математической модели использовалась среда Simulink, входящая в состав MatLab. В имитационном моделировании используются виртуальные модули и устройства, поведенческая модель которых максимально приближена к реальной физической модели.

1. Разработка математической модели волоконно-оптического гироскопа

В данной работе в качестве объекта исследования была выбрана модель волоконно-оптического гироскопа ВГ910Q («Физоптика»), представленная на рис. 2.

Рис. 2. Волоконно-оптический гироскоп
модели ВГ910Q

Ниже приведены технические характеристики гироскопа ВГ910Q.

Параметр	Типовые значения
Диапазон измеряемых скоростей	150 град/с
Масштабный коэффициент (МК) k	7 мВ/град/с
Рабочая полоса частот	0–0,45 кГц
Угловой случайный дрейф	0,04 град/ $\sqrt{ч}$
Дрейф нуля (1σ)	10 град/ч
Стабильность МК, 1σ	0,1 %

Устройство ВОГ показано на рис. 3. ВОГ является оптическим интерферометрическим датчиком вращения. Это датчик, в котором разность фаз интерферирующих волн определяется внешним физическим эффектом. Иногда волоконно-оптические датчики вращения называют гироскопами. Однако принцип их функционирования не имеет ничего общего с классическим гироскопическим эффектом, обусловленным силой Кориолиса. Принцип работы волоконно-оптического датчика вращения основан на релятивистском эффекте Саньяка – появление фазового сдвига встречных электромагнитных волн во вращающемся кольцевом интерферометре. Корректная модель эффекта Саньяка может быть построена только в рамках Общей теории относительности.

Используемое в датчике оптическое волокно, сохраняющее поляризацию излучения, устраняет эффекты вращения поля и обеспечивает исключительную стабильность и точность измерения угловой скорости.

Рис. 3. Устройство волоконно-оптического гироскопа модели ВГ910Q

Выходной сигнал гироскопа содержит мультипликативную и аддитивную погрешности: мультипликативная связана с искажениями масштабного коэффициента, обусловленными температурными факторами; аддитивная – с наличием двух факторов, чувствительных к температуре: сигналом дрейфа нуля и шума [2].

Выходной сигнал гироскопа в общем виде можно представить следующим образом:

$$U_{\text{out}} = k(T) \cdot \omega + U_d(T) + N(T), \quad (1)$$

где U_{out} – выходное напряжение гироскопа, В; $U_d(T)$ – дрейф нулевого значения выходного сигнала, В; $k(T)$ – масштабный коэффициент гироскопа, В/град/с; ω – измеряемая угловая скорость, град/с; $N(T)$ – шум гироскопа, В.

Для статической системы $\omega = 0$.

Для получения количественной оценки параметров температурной зависимости шума гироскопа и дрейфа нуля были проведены экспериментальные исследования выходного сигнала гироскопа от температуры.

Для моделирования эффекта температурной зависимости дрейфа нуля использована аппроксимация среднего значения выходного сигнала гироскопа U_{out} полиномом второй степени. Ниже приведены аппроксимирующие полиномы для выборки трех гироскопов модели ВГ910Q:

$$\begin{aligned} U_{d1}(T) &= 1,023 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2,616 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000307; \\ U_{d2}(T) &= 0,853 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,483 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,000002; \\ U_{d3}(T) &= 3,049 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 3,178 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000071. \end{aligned} \quad (2)$$

Для получения аппроксимирующих температурных зависимостей СКО были выполнены эксперименты для выборки из трех гироскопов в диапазоне температур от 25 до 48 °С. Получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \sigma_1(T) &= 4,26 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000012; \\ \sigma_2(T) &= 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000037; \\ \sigma_3(T) &= 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000061. \end{aligned} \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) параметр T – температура, °С.

На базе приведенного алгоритма средствами Simulink [3] разработана имитационная модель ВОГ, представленная на рис. 4.

Рис. 4. Блок-диаграмма имитационной модели гироскопа: omega, temp – входные порты модели; HyroV, TempV – выходные порты модели; gain – блок, реализующий масштабный коэффициент; TMP-36 – температурный датчик (градуировочная шкала)

На рис. 5 показано поведение выходных сигналов ВОГа ВГ910Q на интервале температур от +25 до +48 °С. На рис. 5 показано экспериментальное поведение выходного сигнала ВОГ без использования коррекции с применением его модели (см. рис. 4). На рис. 6 показано экспериментальное поведение выходного сигнала ВОГ с применением коррекции с помощью его модели.

Рис. 5. Зависимость выходного сигнала реального ВОГа ВГ910Q от температуры без коррекции сигналом его математической модели

Рис. 6. Зависимость выходного сигнала реального ВОГа ВГ910Q от температуры с коррекцией сигналом его математической модели

На рис. 5 кривая с темной линией показывает среднее значение выходного сигнала реального ВОГ. Более светлые линии (серый цвет) показывают СКО шумового сигнала по уровню 1σ .

На рис. 6 показан выходной сигнал ВОГ, скорректированный сигналом его математической модели. Из рисунка видно, что температурный дрейф реального ВОГ, который наблюдался на рис. 5, полностью скорректирован. Наличие шумового сигнала с разбросом напряжений от 0,043 до 0,045 мВ связано с остаточными шумами, которые имеют более сложную температурную зависимость и распределение.

При дальнейшей работе ИИМ на борту военного самолета имитационная модель используется для температурной коррекции выходного сигнала с целью повышения стабильности выходных сигналов ИИМ в заданном температурном диапазоне.

Данная имитационная модель учитывает зависимость дрейфа нуля и СКО шума от температуры, что позволяет повысить точность гиросtabilизации ОЭП в широком интервале температур на 30 %.

Список литературы

1. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Визуальное моделирование. – СПб.: Профессионал, 2000. – 241 с.

2. Евстифеева О.М., Игнатьев С.В. Анализ экспериментальных данных для оценки характеристик точности волоконно-оптического гироскопа / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – СПб., 1978.

3. Simulink – Simulation and Model-Based Design. – URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

References

1. Kolesov Iu.B., Senichenkov Iu.B. Vizual'noe modelirovanie [Visual modeling]. Saint-Petersburg: Professional, 2000, 241 p.

2. Evstifeeva O.M., Ignat'ev S.V. Analiz eksperimental'nykh dannykh dlia otsenki tochnosti volokonno-opticheskogo giroskopa [The analysis of experimental data for an assessment of characteristics of accuracy of a fiber-optical gyroscope]. Saint-Petersburg, 1978.

3. Simulink – Simulation and Model-Based Design, available at: <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

Получено 27.11.2014