

Литература

1. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – London: Artech House, 1992. – 313 p.
2. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
3. Мешковский И.К., Унтилов А.А., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 7. – С. 76–80.
4. Meshkovskii I.K., Strigalev V.Ye., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynskii D.V., Untilov A.A. Three Axis Fiber Optic Gyroscope: Development and Test Results // Gyroscopy and Navigation. – 2011. – V. 2. – № 4. – P. 208–213.
5. Eron'yan M.A. Method of fabricating fiber lightguides that maintain the polarization of the radiation // Russian Patent. – 2000. – № 2. – P. 155–359.
6. Bureev S.V., Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Komarov A.V., Levit L.G., Khokhlov A.V., Zlobin P.A., Strakhov V.I. Processing large blanks of anisotropic single-mode lightguides with elliptical cladding // J. Opt. Technol. – 2007. – V. 74. – № 4. – P. 297–298.
7. Варламов А.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е., Варжель С.В., Аксарин С.М. Определение оптических потерь при стыковке световодов с различным диаметром модового поля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 23–26.
8. Воронин В.Г., Долгалева К.П., Наний О.Е., Туркин А.Н., Щербаткин Д.Д., Хлыстов В.И. Интегральные потери в элементах волоконно-оптических линий связи. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2000. – 22 с.
9. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Медведев А.В. Интерференционный метод измерения коэффициента экстинкции двулучепреломляющих волоконных световодов // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 5. – С. 102–103.
10. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987. – 616 с.

- Аксарин Станислав Михайлович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, oskar2002@list.ru
- Архипов Сергей Владимирович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, thinkingcreature@yandex.ru
- Варжель Сергей Владимирович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, vsv187@gmail.com
- Куликов Андрей Владимирович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.kulikov86@gmail.com
- Стригалева Владимир Евгеньевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 681.787

СТАБИЛИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА ФАЗОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.С. Алейник, И.Г. Дейнека, А.А. Макаренко, М.В. Мехреньгин, В.Е. Стригалева

Проведено программное моделирование фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа в пакете прикладных программ MATLAB. Описан механизм искажения фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа, который заключается в изменении скорости выхода гироскопа на режим, что, в свою очередь, может быть вызвано изменением оптической мощности в системе при изменении температуры окружающей среды. Проведен поиск и теоретический анализ существующих методов стабилизации фазовой характеристики – использования фильтра с бесконечной фазовой характеристикой и программного управления коэффициентом усиления фотоприемного устройства. Установлено, что имеющиеся методы не решают поставленной задачи, так как не устраняют первопричину возникновения искажений фазовой характеристики сигнала волоконно-оптического датчика. Разработан новый метод стабилизации фазовой характеристики сигнала фазового волоконно-оптического датчика. Метод основан на введении нормировки разностей показаний аналого-цифрового преобразователя, несущих полезный сигнал о скорости вращения. Проведено экспериментальное исследование задержек в приборе БИМ-3 при изменении температуры в диапазоне 25–29°C. Результаты исследования показали уменьшение максимальной величины задержки в 4 раза и уменьшение диапазона изменения величины задержки с 280 до 7 мкс при введении нормировки.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, фазовая характеристика, фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, нормировка.

Введение

Одним из важнейших направлений развития современного приборостроения в области систем навигации, ориентации и управления подвижными объектами является совершенствование существующих и создание новых датчиков первичной информации, приборов и систем на их основе. При этом наиболее перспективными являются приборы, построенные на базе волоконно-оптических датчиков [1].

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) представляет собой датчик угловой скорости в инерциальном пространстве, действие которого основано на эффекте Саньяка.

Волоконно-оптические гироскопы по сравнению с механическими являются более надежными, так как в составе ВОГ отсутствуют какие-либо подвижные элементы, вследствие чего они могут использоваться в более жестких условиях эксплуатации. Также благодаря структуре статического типа появляются еще ряд достоинств: устойчивость к ускорению, простота конструкции, короткое время запуска и низкая потребляемая мощность. Потенциальная точность такого ВОГ составляет $7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{ч}$ [2].

Описание проблемы

Основной сложностью на сегодня является то, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он чрезвычайно подвержен различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. Примерами таких воздействий являются нестационарные температурные поля [3], акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля [4].

Одним из следствий воздействия случайных тепловых полей на ВОГ является искажение фазовой характеристики. Фазовая характеристика ВОГ, полученная в результате программного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB, представлена на рис. 1.

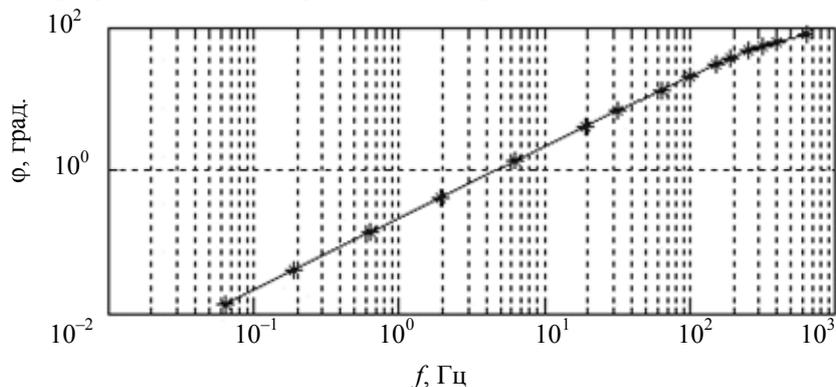


Рис. 1. Фазовая характеристика ВОГ

Рассмотрим механизм возникновения задержки по фазе. Прямоугольная смещающая модуляция в случае ВОГ является наиболее распространенной. Принципиальная схема работы данного типа модуляции показана на рис. 2 [2].

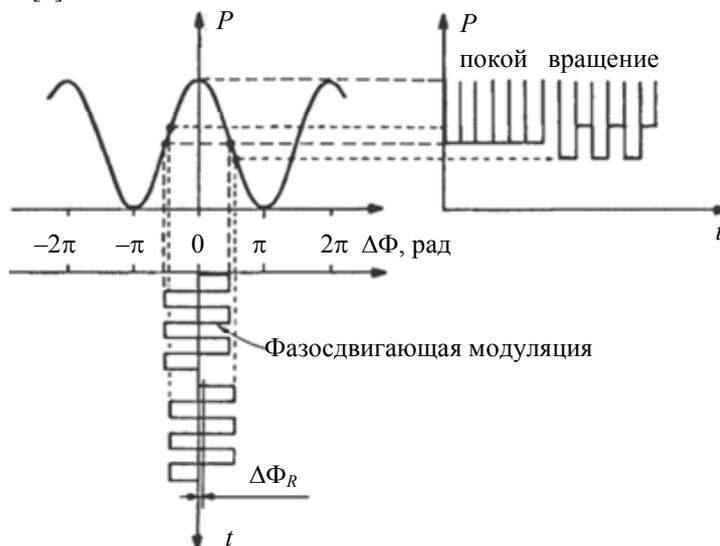


Рис. 2. Прямоугольная смещающая модуляция [2]

Этот тип модуляции–демодуляции применяется как оптимальная смещающая техника, потому что он создает синусоидальный отклик со стабильным смещением [2]. Вид модулированного отклика ВОГ представлен на рис. 3.

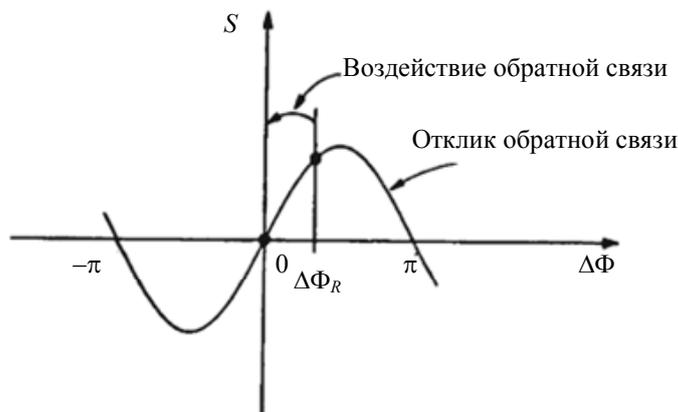


Рис. 3. Синусоидальный отклик ВОГ [2]

В случае отсутствия первой обратной связи выходной сигнал ВОГ является нелинейным, так как описывается функцией синуса. По этой причине для расширения динамического диапазона и увеличения точности прибора предпочтительнее использовать ВОГ с замкнутой петлей обратной связи. Также отклик ВОГ зависит от чувствительности фотодетектора, оптической мощности на фотоприемнике и средней длины волны источника излучения.

Принцип работы ВОГ с замкнутой петлей обратной связи представлен на рис. 3. При использовании схемы с замкнутой петлей обратной связи обеспечивается линейный отклик с хорошей стабильностью. При этом скорость работы обратной связи зависит от добавки к величине подставки. Добавка вычисляется как разность между двумя соседними показаниями фотоприемника

$$\Delta = U_n - U_{n-1}, \quad (1)$$

где U_n – текущая величина напряжения на выходе фотоприемника, U_{n-1} – предыдущая величина напряжения на выходе фотоприемника. В свою очередь, напряжение на выходе фотоприемника выражается формулой

$$U_{\text{фн}} = P\eta R, \quad (2)$$

где P – мощность, детектируемая на фотоприемнике; η – чувствительность фотоприемника; R – сопротивление трансимпедансного усилителя [5]. Если выразить мощность на фотоприемнике через оптическую мощность одного из интерферирующих пучков, то получим

$$U_{\text{фн}} = 4P_0 \cos(\Delta\varphi_S + \Delta\varphi_M) \eta R, \quad (3)$$

где P_0 – оптическая мощность одного из интерферирующих пучков; $\Delta\varphi_S$ – разность фаз Саньяка; $\Delta\varphi_M$ – модулирующая разность фаз [5]. Таким образом, изменение оптической мощности в схеме, которое, в том числе, может быть вызвано изменением температуры, приводит к изменению напряжения, детектируемого на фотоприемнике. Изменение напряжения на выходе фотоприемника приводит к изменению величины добавки к подставке первой обратной связи, исходя из формулы (1). Скорость изменения величины подставки, которая зависит от величины добавки, влияет на скорость работы обратной связи и скорость выхода гироскопа на режим [6]. Это приводит к искажению фазовой характеристики ВОГ.

Стоит пояснить, что изменение фазовой характеристики ВОГ при использовании одного гироскопа приводит к изменению передаточной характеристики и небольшому изменению величины ошибки от температуры. Однако применение одного гироскопа не имеет практической ценности. Исходя из этого, применяются системы из трех гироскопов для измерения угловой скорости движения объекта в каждой из трех плоскостей пространства [7].

При использовании системы из трех ВОГ изменение фазовой характеристики одного из приборов приводит к рассогласованию показаний ВОГ в составе системы друг относительно друга, т.е. к ошибке по координате. Величина этого рассогласования может достигать нескольких сотен микросекунд и серьезно влиять на точность итогового отклика прибора.

Для решения этой проблемы необходимо свести разности выходных задержек всех ВОГ, используемых в системе, к минимуму.

Способы решения проблемы искажения фазовой характеристики

Изначально было предложено два варианта решения поставленной задачи:

- применение фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для изменения фазовой характеристики каждого из гироскопов;

– реализация программного управления коэффициентом усиления фотоприемного устройства.

Применение цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для обеспечения временного фазового согласования ВОГ заключается во внесении различных дополнительных задержек в показания каждого из гироскопов. Разработанный фильтр использует механизм фильтрации, который можно описать формулой

$$Y_{\text{вых}} = x(i)K_1 + x(i-1)K_2 + y(i-1)K_3, \quad (4)$$

где $Y_{\text{вых}}$ – выходной сигнал (величина, принимаемая далее за подставку); x – входной сигнал (реальная величина подставки); K_1, K_2 – коэффициенты входного сигнала; K_3 – коэффициент обратной связи.

Данный метод позволяет корректировать фазовое рассогласование до определенных величин задержек (порядка 10 мкс), т.е. существует лишь некоторый диапазон задержек между показаниями ВОГ, в котором данный метод работает успешно. Кроме того, такой подход не устраняет самой причины появления фазового рассогласования, поэтому при изменении температуры эффективность метода резко снижается, и коэффициенты фильтра приходится изменять.

Как было описано выше, величина сдвига фазовой характеристики зависит от изменения оптической мощности, поэтому второй метод стабилизации фазовой характеристики гироскопа основан на программном управлении коэффициентом усиления фотоприемного устройства. В результате использования данной техники можно уравнивать оптические мощности в каждом из гироскопов и в дальнейшем установить одинаковые коэффициенты первой обратной связи. Эти действия приводят к временному фазовому согласованию ВОГ в составе изделия. К сожалению, результат работы этого метода также зависит от изменения температуры внешней среды. При этом возникает нестабильность в работе гироскопа, и данный метод также не приводит к решению поставленной задачи.

Стабилизация фазовой характеристики с помощью нормировки

Известно, что изначально величина подставки в схеме с первой обратной связью рассчитывалась в цифровом устройстве обработки как разность между двумя соседними показаниями аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Как упоминалось выше, точность такого способа обработки напрямую зависит от изменения величины оптической мощности излучения под действием температуры. В связи с этим созданный метод стабилизации фазовой характеристики сигнала ВОГ заключается в нормировке значений разницы соседних показаний АЦП, несущих полезный сигнал о скорости вращения. Нормировка выполняется в соответствии с выражением

$$\Delta = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n + x_{n-1}}, \quad (5)$$

где x_n – текущее показание АЦП; x_{n-1} – предыдущее показание АЦП;

Был проведен ряд измерений с целью доказать работоспособность данного метода на практике, используя реальную модель гироскопа. На первом этапе использовалась схема обработки без системы нормировки. Результаты этих испытаний представлены на рис. 4. График (рис. 4, а) отражает зависимость температуры внешней среды от времени. Графики (рис. 4, б, в) отображают изменение величины задержки между показаниями гироскопов $x-z$ и $y-z$ соответственно в зависимости от времени.

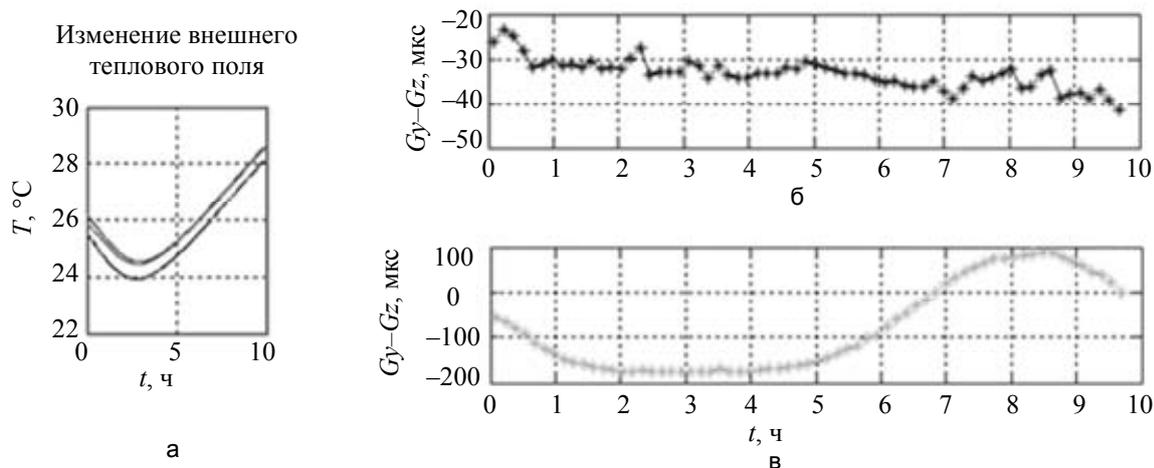


Рис. 4. Фазовые задержки ВОГ в составе системы до введения нормировки: показания с датчиков температуры в ВОГ X, Y, Z (а); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где G_x – показания гироскопа X, G_y – показания гироскопа Y (б); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где G_x – показания гироскопа X, G_z – показания гироскопа Z (в)

Из графиков (рис. 4, б, в) видно, что задержка изменяется в пределах от -180 до 100 мкс, т.е. в большом диапазоне – порядка 280 мкс.

Далее в систему цифровой обработки сигнала была добавлена разработанная система нормировки, и проводились повторные испытания, результаты которых представлены на рис. 5. Данные эксперимента показывают, что максимальная величина задержки в системе составила 44 мкс по абсолютному значению. Иначе говоря, значение максимальной задержки уменьшилось более чем в 4 раза. Также стоит отметить, что диапазон, в котором изменяется величина задержки, составил всего $6-7$ мкс, что очень мало в сравнении с изначальными 280 мкс. Все эти факты свидетельствуют о выполнении поставленной задачи.

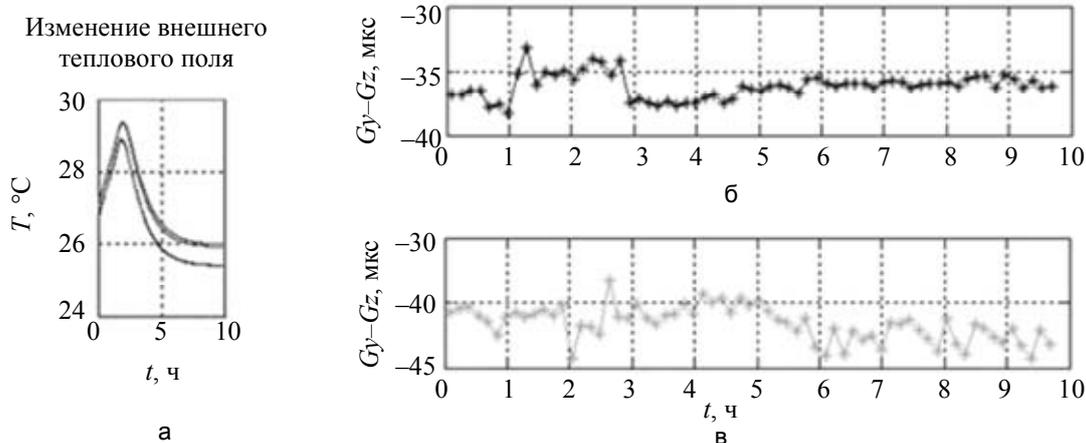


Рис. 5. Фазовые задержки ВОГ в составе системы после введения нормировки: показания с датчиков температуры в ВОГ X, Y, Z (а); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где G_x – показания гироскопа X, G_y – показания гироскопа Y (б); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где G_x – показания гироскопа X, G_z – показания гироскопа Z (в)

Заключение

В результате работы был создан и программно реализован метод стабилизации фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа и временного фазового согласования волоконно-оптических гироскопов в составе прибора. В ходе экспериментальной проверки предложенного метода была доказана его работоспособность на примере исследования задержек в приборе БИМ-3 при изменении температуры в диапазоне $25-29^\circ\text{C}$. При этом максимальная величина задержки уменьшилась в 4 раза, а диапазон изменения задержки от температуры уменьшился с 280 до 7 мкс. В настоящее время разработанный метод успешно используется в плате обработки сигналов волоконно-оптического гироскопа.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S.Yu. Fiber Optic Sensors. – 2nd ed. – Pennsylvania State University: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
2. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Artech House, 1993. – 314 p.
3. Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 2. – С. 47–51.
4. Мешковский И.К., Олехнович Р.О., Тараканов С.А. Изучение изменения сигнала волоконно-оптического гироскопа, вызванного изменением температуры окружающей среды и внешним магнитным полем // Научно-технический вестник СПб ГУИТМО. – 2008. – № 4 (49). – С. 164–174.
5. Lefevre H.C. Ultimate-Performance Fiber-Optic Gyroscope: A Reality // 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan. – 2011. – P. 75–78.
6. Драницына Е.В., Егоров Д.А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2012. – С. 94–100.
7. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.

- Алейник Артем Сергеевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, artemal@rambler.ru
- Дейнека Иван Геннадьевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vanodnk@gmail.com
- Макаренко Александр Александрович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a_makarenko@mail.ru
- Мехреньгин Михаил Викторович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mehrengin@gmail.com
- Стригалеv Владимир Евгеньевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 528.526.6

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА НА ПОКАЗАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

И.А. Шарков, А.В. Рупасов, В.Е. Стригалеv, С.А. Волковский

Рассматривается вопрос влияния температурной нестабильности источника излучения на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа, построенного по схеме с обратной связью. Известно, что нагрев источника в основном приводит к изменению величины масштабного коэффициента. В работе произведен расчет влияния величины центральной длины волны эрбиевого широкополосного источника на величину масштабного коэффициента и сигнал волоконно-оптического гироскопа. При скорости вращения прибора $13^\circ/\text{ч}$ (скорость вращения Земли) ошибка определения скорости должна составить $d\Omega_{\text{ош}}=7,2 \cdot 10^{-5} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$, но уже при скорости вращения $1^\circ/\text{ч}$ ошибка составит $d\Omega_{\text{ош}}=1,9 \cdot 10^{-2} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$. Полученный результат сравнен с экспериментальными данными, полученными при нагреве источника в термокамере при детектировании скорости вращения Земли. При этом ошибка определения скорости составила $d\Omega_{\text{ош}}=3 \cdot 10^{-3} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$, т.е. значительно больше рассчитанной ранее для масштабного коэффициента. Дополнительный эксперимент с переворотом плоскости гироскопа на 180° показал, что обнаруженная ошибка связана с дрейфом нуля, а не с изменением масштабного коэффициента. Очевидно, что возникающая при нагреве источника излучения ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в $0,01^\circ/\text{ч}$ (1σ) уже при незначительном изменении температуры. Полученные в работе данные обусловили необходимость доработки источника и введения механизма термостабилизации его активных элементов.

Ключевые слова: ВОГ, тепловой дрейф ВОГ, эрбиевый широкополосный источник излучения, дрейф нуля ВОГ, дрейф масштабного коэффициента ВОГ.

Введение

Уже несколько десятилетий волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации. В настоящее время ВОГ производятся многими индустриально развитыми странами – США (Northrop Grumman, KVH Industries, Honeywell), Франция (IXSEA) и др. По своим точностным и эксплуатационным характеристикам ВОГ не уступают другим типам гироскопов, а по ряду параметров, таких как меньшая себестоимость, отсутствие вращающихся частей, больший срок службы, меньшее время выхода на режим и т.д., даже превосходят их. ВОГ выделяется среди других приборов навигации наибольшей сложностью и многообразием происходящих в нем физических явлений [1].

Существует ряд публикаций ([2–9] и др.), в которых обсуждается проблема теплового дрейфа. На основе этих материалов можно с уверенностью сказать о невозможности создания ВОГ навигационного класса точности без учета влияния температурного дрейфа.

Исследования влияния температуры на активные элементы (источник, волоконно-оптический контур, модулятор и т.д.) разрабатываемого ВОГ также показали наличие большого количества различных процессов, приводящих к изменению характеристик элементов при их нагреве и соответственно к дрейфу показаний ВОГ. Целью настоящей работы является исследование влияния температурной нестабильности характеристик источника излучения на показания волоконно-оптического гироскопа.

Влияние источника излучения на стабильность масштабного коэффициента

Как известно, работа волоконно-оптического гироскопа основана на эффекте Саньяка, заключающемся в том, что при вращении волоконно-оптического интерферометра со скоростью Ω лучи, распро-