

УДК 621.372.82

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-185-190

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ УКЛАДКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТУРА НА ТЕПЛОВОЙ ДРЕЙФ ГИРОСКОПА

М. А. Савин, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

М. А. Ошивалов, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

К. С. Галягин, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

При использовании прямого численного моделирования для оценки величины теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних воздействий не удается получить расчетные данные, согласующиеся с экспериментом. Одной из причин этого является наличие случайных дефектов, связанных с нарушением регулярности укладки витков оптоволоконного контура гироскопа. Цель данного исследования состоит в оценке степени влияния дефектов укладки оптоволокна на показания гироскопа при внешних нестационарных тепловых воздействиях. Приводятся математическая и компьютерная модели для расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, а также методология расчета. Основной особенностью предложенной модели является решение задачи термоупругости для регулярной микронеоднородной среды волоконно-оптического массива в конструктиве гироскопа. На основании обработки полевой информации о тепловом и напряженно-деформированном состоянии в витках световода решается задача пьезооптики, целью которой является расчет термически индуцированной «кажущейся» угловой скорости. Приводится расчетный тепловой дрейф гироскопа при изменении температуры окружающей среды от +20 до +60 °С в случае идеального волоконного контура с бездефектной укладкой в сопоставлении с результатами численного моделирования дрейфа с учетом характерных, встречающихся на практике дефектов. Для каждого дефекта приводится его описание с демонстрацией реального расположения в волоконном массиве, а также объяснение причин, вызывающих изменение дрейфа.

Полученные результаты расчета убедительно демонстрируют многократное возрастание теплового дрейфа гироскопа даже при учете единичных дефектов укладки волоконного контура. В связи с этим становится очевидным, что для повышения точности и надежности навигационного прибора большое значение приобретают требования строгого контроля технологии укладки волокна на каркасе датчика чувствительности гироскопа.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, тепловой дрейф, эффект Саньяка, прямое численное моделирование, укладка оптоволокна, дефекты.

Введение

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) является наиболее надежным навигационным прибором среди бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Высокая точность и надежность ВОГ обусловлена принципом его работы, основанным на эффекте Саньяка [1, 2].

Согласно эффекту Саньяка встречно распространяющиеся по вращающемуся оптоволоконному контуру лучи обойдут этот контур за разное время. Прибор регистрирует это время в виде интерференционной картины на фотодетекторе и преобразует в угловую скорость.

Вращение волоконного контура (ВК), а значит, и вращение самого ВОГ есть не что иное как вращение тела, на котором установлен при-

бор. Поэтому внутри гироскопа отсутствуют всевозможные подвижные части, снижающие надежность.

Тем не менее ВОГ имеет существенный недостаток, проявляющийся в виде отклонений полезного сигнала (дрейфа) покоящегося прибора при внешнем нестационарном тепловом или механическом возмущении [3–6]. При этом меняется напряженно-деформированное состояние (НДС) ВК, и согласно эффекту фотоупругости изменяется показатель преломления в оптическом волокне, приводящий к изменению скорости прохождения светового импульса.

Для анализа конструкторских решений с целью минимизации теплового дрейфа ВОГ была разработана компьютерная модель, позволяю-

щая проводить сравнительную оценку возможной амплитуды дрейфа.

Компьютерная модель

Модель строится в предположении идеальности изготовления конструктива прибора, разрешается в осесимметричной постановке для регулярной микронеоднородной среды волоконного контура. Само по себе решение задачи о тепловом дрейфе распадается на две подзадачи: определение термо-НДС ВК в составе гироскопа и расчет дрейфа гироскопа по соотношениям пьезооптики.

На рис. 1 приведена схема расчетной области в виде осевого сечения датчика чувствительности ВОГ. Волоконный контур (1) является чувствительным элементом ВОГ и жестко монтируется на каркасе (2), расположенном под электромагнитными (4) и тепловыми экранами (3). Оставшийся внутренний объем занимает воздух (5). Тепловой нагрев датчика чувствительности моделируется всесторонним воздействием окружающей среды на наружную поверхность электромагнитного экрана (4) по закону Ньютона – Рихмана.

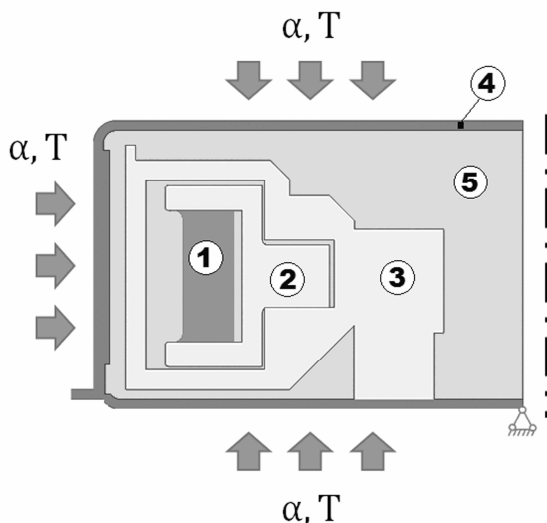


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – волоконно-оптический контур; 2 – каркас; 3 – тепловой экран; 4 – электромагнитный экран; 5 – воздух

Математическая постановка задачи

Задача термоупругости имеет стандартную постановку в рамках теории упругости для изотропных тел и разрешается для единой разномодульной области (задача не является контактной). Математическая модель включает:

- уравнения движения и соотношения Коши:

$$\nabla \cdot \sigma + \rho \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \tau^2};$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} - \frac{\alpha}{K} \Delta T \delta_{ij};$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}).$$

Так как задача является квазистатической, правая часть и вектор внешних сил в уравнении движения обратятся в ноль, а само уравнение обратится в уравнение равновесия;

- нестационарное уравнение теплопроводности:

$$c^* \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где c^* – теплоемкость; ρ – плотность; λ^* – теплопроводность тела;

- уравнение состояния идеального газа для воздуха $Pv = RT$;

- граничные условия на свободных поверхностях:

$$\alpha (T_{env} - T_b) = -\lambda^* \text{grad}(T);$$

$$\vec{\sigma} = 0,$$

где T_{env} – температура окружающей среды; T_b – температура наружной поверхности экрана (4).

Закрепление модели: $\vec{u}|_{r=0, z=0} = 0$.

Сеточная модель волоконно-оптического контура генерируется из сеточных моделей каждого витка оптоволоконна в автоматическом режиме (рис. 2), обеспечивая качественную и одинаковую сетку для всего контура. Сеточная модель всей расчетной области представлена на рис. 3 и содержит порядка 5 млн конечных объемов.

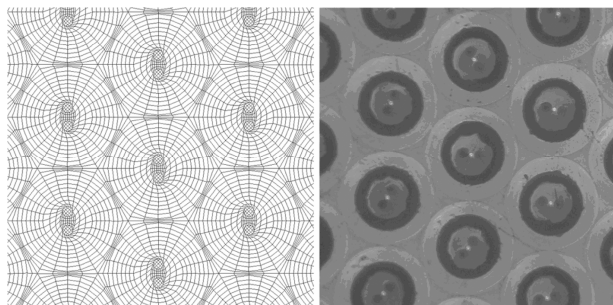


Рис. 2. Сеточная модель волоконно-оптического контура

Математическая постановка второй подзадачи, ориентированной на численный расчет кажущейся угловой скорости, базируется на принципах фотоупругости [7]. Суть эффекта фотоупругости для оптически прозрачного ма-

териала заключается в том, что его коэффициент преломления зависит от НДС материала. Коэффициентами, осуществляющими связь изменения показателя преломления с нормальными напряжениями, приложенными вдоль главных кристаллографических направлений, являются фотоупругие постоянные материала c_1 и c_2 .

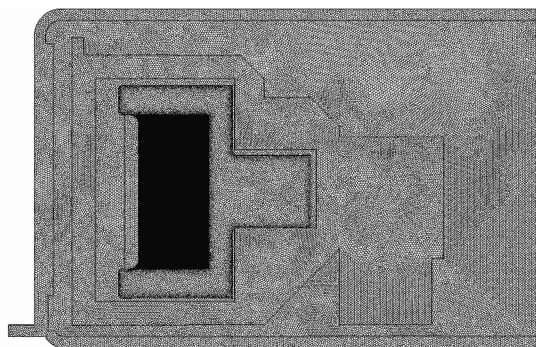


Рис. 3. Сеточная модель ВОГ

Для расчета дрейфа (фиктивной угловой скорости) необходимо преобразовать полевую информацию о термо-НДС ВК, полученную из решения задачи термоупругости, в линейную последовательность данных для задачи пьезооптики. Для этого используется специальный алгоритм, упорядочивающий исходные значения напряжений и температур в световодной жиле каждого витка ВК в соответствии с квадрупольной [8] схемой укладки. Затем выполняется процедура расчета дрейфа, включающая:

– расчет коэффициента преломления в оптическом волноводе по соотношениям вида

$$n_i = n_{0i} \sqrt{1 + \frac{c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3)}{n_{0i}^2}},$$

где n_i – показатель преломления в i -м витке; n_{0i} – начальный показатель преломления; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в световоде;

– решение уравнения движения двух встречно распространяющихся с переменной скоростью световых лучей по оптоволоконному контуру $\frac{dx}{d\tau} = \frac{c}{n(x, \tau)}$;

– определение времени пробега Δt каждым лучом каждого витка контура с учетом изменений показателя преломления, вычисление разности фаз $\Delta\phi$ в каждом витке путем интегрирования по всем виткам контура определение общего фазового набег по полученным временам, и, наконец, расчет фиктивной угловой скорости Ω по формуле Саньяка:

$$\Omega = \frac{c\lambda\Delta\phi}{8\pi S_v}, \quad \text{где } \Delta\phi = \frac{2\pi c}{\lambda} \sum_{i=1}^N (\Delta\tau_{1i} - \Delta\tau_{2i}).$$

Здесь c – скорость света; λ – длина волны излучения; S_v – суммарная площадь витков волоконно-оптического контура.

Более подробно построение математической и компьютерной моделей рассмотрено в [9, 10], а результаты практической апробации представлены в [11].

Дефекты укладки контуров

Основной особенностью при прямом численном моделировании дрейфа остается предположение об идеальности укладки оптоволоконна в ВК. На практике все оптические контуры имеют различные дефекты, возникающие в процессе производства. Эти дефекты случайны и, как правило, несимметричны (рис. 4).

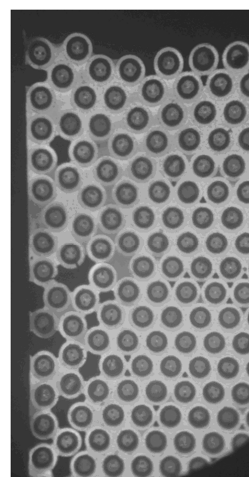


Рис. 4. Дефекты укладки реального волоконного контура

К характерным дефектам укладки, наиболее часто встречающимся в контурах, можно отнести пустоты, порожденные отсутствием компунда, нарушение рядности, вызванное сдвигом слоев, а также отсутствие части витков на внешнем слое (рис. 5).

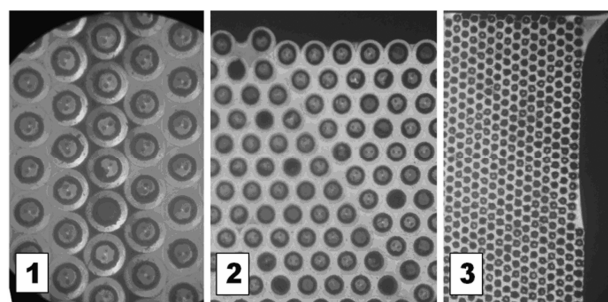


Рис. 5. Характерные дефекты:
1 – пустоты; 2 – сдвиг слоев; 3 – незавершенный слой

Для оценки влияния дефектов на тепловой дрейф гироскопа сделана попытка их учета в разработанной компьютерной модели. При этом в модели одновременно рассматривается лишь один из приведенных на рис. 5 дефектов.

Все численные эксперименты проходили при одинаковых условиях: изменение температуры среды с темпом $1^\circ/\text{мин}$ с последующей термостабилизацией на температуре $+60^\circ\text{C}$, что соответствует штатному режиму работы термокамеры при натуральных испытаниях. Для

всех вариантов расчета (кроме незавершенного слоя) использовался один и тот же волоконный контур, состоящий из 40 слоев с чередованием 79-80 витков в слое. При расчете дрейфа для преобразования полевой информации состояния витков в линейную использована квадратурная схема укладки.

Результаты моделирования

В результате для температурного перехода $+20\dots+60^\circ\text{C}$ получены следующие данные, представленные на рис. 6.

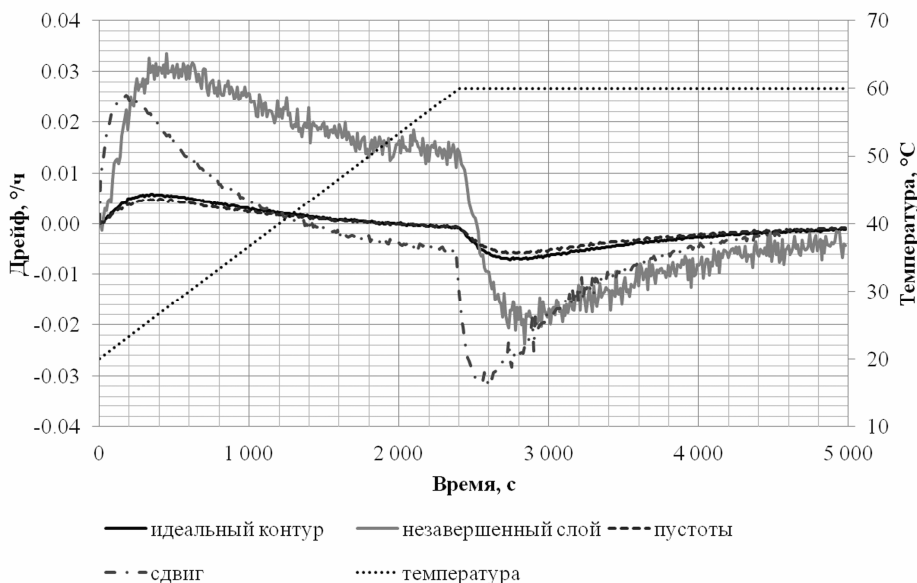


Рис. 6. Расчетный тепловой дрейф гироскопа

Учет пустот между слоями в ВК в осевом направлении (см. рис. 5, 1), практически не повлиял на характер динамики изменения фиктивных показаний гироскопа. Напротив, дрейф в этом случае незначительно снизился (штриховая линия на рис. 6) в силу механической разгрузки витков световода на поверхности образовавшейся «трещины».

Совершенно иначе гироскоп реагирует на введение в расчетную схему расположения витков контура блочного сдвига (см. рис. 5, 2), когда часть витков каждого слоя контура смещаются в радиальном направлении относительно друг друга на величину, обычно не превышающую толщины слоя, без нарушения общей регулярности. Дрейф в этом случае (штрих-пунктир на рис. 6) возрастает более чем в 4 раза по сравнению с бездефектным случаем.

Еще большее увеличение дрейфа наблюдается при введении в рассмотрение дефекта, выражаемого незавершенностью внешнего слоя оп-

товолоконного массива (см. рис. 5, 3; серая линия на рис. 6). В этом случае дрейф возрастает почти в 5,5 раз и слабо меняет амплитуду в течение всего термоперехода вплоть до момента начала режима термостабилизации. Рост дрейфа обусловлен нарушением оптической симметрии ВК, вследствие чего и возникает весьма существенная фазовая невязанность, определяющая «кажущуюся» угловую скорость. Это обстоятельство усугубляется тем, что именно внешние витки ВК вносят наибольший вклад в возникновение дрейфа гироскопа.

Выводы

Из анализа приведенных результатов можно сделать вывод, что присутствие в реальной конструкции гироскопа дефектов укладки световодящего контура может оказать негативное влияние на его работу. Это означает, что для повышения точности и надежности навигационного прибора большое значение приобретает строгий контроль технологии укладки оптоволоконного массива на каркасе ВОГ.

Библиографические ссылки

1. Hervé C. Lefèvre. The Fiber-Optic Gyroscope. Second Edition. Boston-London : Artech House, 2014. 343 p.
2. Virgil Ch. Vorbereitung und Durchführung von dreikomponentigen Magnetfeldmessungen mit dem Göttinger Bohrloch Magnetometer : Dis. ... Dr. rer. nat. Braunschweig, 2012. 184 p.
3. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М. : Радио и связь, 1987. 152 с.
4. Analysis of Shupe Effect in Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber-Optic Gyroscope / Ningfang SONG [et al.] // Optical review. 2014. Vol. 21(3). Pp. 276-279.
5. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 150 с.
6. Shupe D. M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer // Appl. Opt. 1980. Vol. 19, no. 5, pp. 654-655. DOI: 10.1364/AO.19.000654/
7. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М. : Наука, 1973. 576 с.
8. Новиков Р. Л. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа : дис. ... канд. тех. наук: 05.11.14. СПб., 2014. 94 с.
9. Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А. Учет пьезооптических эффектов при моделировании теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 55–71.
10. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях / К. С. Галягин, М. А. Ошивалов, М. А. Савин, Ю. А. Селянинов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 978–984.
11. Галягин К. С., Савин М. А. Моделирование погрешностей волоконно-оптического гироскопа // Master's Journal. 2015. № 1. URL: http://vestnik.pstu.ru/mj/archives/?id=&folder_id=4765. – Заглавие с экрана.
2. Virgil Ch. (2012). Vorbereitung und Durchführung von dreikomponentigen Magnetfeldmessungen mit dem Göttinger Bohrloch Magnetometer: Dis. ... Dr. rer. nat. Braunschweig, 184 p.
3. Sheremet'ev A.G. (1987). *Volokonnyj opticheskij giroskop* [Fiber optical gyro]. Moscow: *Radio i svjaz'* (in Russ.).
4. Ningfang Song, Zuoming Sun, Jingming Song, Wang Shu, Shuai Li, Chunxi Zhang (2014). Analysis of Shupe Effect in Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber-Optic Gyroscope. *Optical review*, 21(3), pp. 276-279.
5. Dzhashitov V. Je., Pankratov V. M. (2001). *Matematicheskie modeli teplovogo drejfa giroskopicheskikh datchikov inercial'nyh system* [The mathematical models of thermal drift of gyro transmitters of inertial systems]. Saint-Petersburg: *Jelektropribor* (in Russ.).
6. Shupe D. M. (1980). Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer. *Appl. Opt.*, 19(5), pp. 654-655. available at <https://www.doi.org/10.1364/AO.19.000654>
7. Aleksandrov A. Ja., Ahmetzjanov M. H. (1973). *Poljarizacionno-opticheskie metody mehaniki deformiruemogo tela* [The photoelastic method of solid-state mechanics]. Moscow: *Nauka* (in Russ.).
8. Novikov R. L. (2014). *Tekhnologicheskoe oborudovanie i metody povysheniya kachestva namotki volokonno-opticheskogo giroskopa* [Processing equipment and methods of the winding's upgrading of the fiber-optic circuit of fiber-optic gyro], PhD thesis. Saint-Petersburg, *IFMO* (in Russ.).
9. Galjagin, K. S., Oshivalov, M. A., Savin, M. A. (2015). Simulation of thermal drift of fiber-optic gyroscope taking into account piezo-optical effects. *PNRPU Mechanics Bulletin*, no. 4, pp. 55-71. <https://www.doi.org/10.15593/perm.mech/2015.4.04>
10. Galjagin, K. S., Oshivalov, M. A., Seljaninov Ju. A., Savin, M. A. (2015). A computer model for simulating errors of the output signal of the fiber optic gyroscope under environmental loads. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*, no. 58(12), pp. 167-172. <https://www.doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-12-167-172>
11. Galjagin, K. S., Savin, M. A. (2015). Simulation errors of fiber optic gyros. *Master's journal*, no. 1, pp. 67-72.

References

1. Hervé C. Lefèvre (2014). *The Fiber-Optic Gyroscope. Second Edition*. Boston-London: Artech House.

The Influence of Fiber-Optic Circuit's Laying Defects on the Gyro's Thermal Drift

M. A. Savin, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

M. A. Oshivalov, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

K. S. Galyagin, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The approach that uses direct numerical simulation to estimate the value of the thermal drift of a fiber-optic gyroscope under the action of external forces fails to provide computational data consistent with experiment. One of the reasons is the presence of random defects associated with a violation of the regularity of optical fiber turns wrapped on the fiber optic gyro coil. The purpose of this study is to assess the influence of optical fiber winding defects on the gyroscope readings under external non-stationary thermal loads. The paper introduces the mathematical and computer models for calculating the thermal drift of a fiber-optic gyroscope and considers the details of the computational technique. The main feature of the proposed model is solving a thermal elasticity problem for a regular microinhomogeneous medium of optical fiber winding within the structure of a gyroscope. The data of processing the field

information on the thermal and stress-strain states of the optical fiber turns are used to solve the piezo-optical problem with the aim to calculate the thermally induced “apparent” angular velocity. The thermal drift of the gyroscope calculated for the ambient temperature ranging from + 20 to + 60 °C for an ideal fiber coil with a defect-free winding is compared with the results of numerical drift simulation taking into account typical defects encountered in practice. The paper presents a description of each defect including information on its location in the fiber array, as well as an explanation of the reasons for a drift change.

The obtained results of calculation provide convincing evidence for a multiple increase in the thermal drift of the gyroscope even in the case of considering the single defects in the optical fiber winding. Therefore it is obvious that in order to increase the accuracy and reliability of the navigation device it is necessary to meet the requirement of strict control of the technology of fiber winding on the gyro sensor coil.

Keywords: fiber optical gyro, thermal drift, Sagnac effect, direct numerical modeling, laying of optical fiber, defects.

Получено 16.04.2018