

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-817-822

УДК 53.096

Оценка задержки детектирования температуры чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа

Даниил Сергеевич Смирнов¹✉, Иван Геннадьевич Дейнека²,
Данила Ренатович Деветьяров³, Филипп Владимирович Скляр⁴,
Азамат Булатович Мухтубаев⁵, Евгений Владимирович Востриков⁶

^{1,2,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{3,4} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

¹ dsmirnov@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

² igdeyneka@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>

³ nineyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4196-3260>

⁴ sklyarov.fil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1178-9476>

⁵ Mukhtubaev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>

⁶ e.v.vostrikov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>

Аннотация

Применение алгоритмической температурной компенсации с использованием внешнего термодатчика требует дополнительной синхронизации его показаний и реакции волоконно-оптического датчика на тепловое воздействие относительно времени регистрации. В работе рассмотрен подход к оценке задержки детектирования изменения температуры сегмента оптического волокна волоконно-оптического гироскопа относительно внешнего датчика температуры. Датчик температуры установлен в конструкции волоконно-оптического контура. Оценка задержки выполнена на основании температур сегмента оптического волокна, получаемых с использованием частотного рефлектометра высокого разрешения и данных температуры датчика, установленного в конструкции волоконно-оптического контура. Произведена оценка задержки детектирования температуры чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа внешним датчиком. Подход дает возможность оценить задержку каждого датчика в составе конструкции на основании детектирования температуры чувствительного элемента относительно внешнего датчика температуры. Полученные величины могут быть использованы для улучшения эффективности компенсации теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа.

Ключевые слова

волоконно-оптические датчики, волоконно-оптическая рефлектометрия, температурные измерения, задержка детектирования, волоконно-оптический гироскоп

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, название проекта «Создание производства волоконно-оптических гироскопов для контрольно-измерительных устройств и наземных транспортных систем», соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019.

Ссылка для цитирования: Смирнов Д.С., Дейнека И.Г., Деветьяров Д.Р., Скляр Ф.В., Мухтубаев А.Б., Востриков Е.В. Оценка задержки детектирования температуры чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 817–822. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-817-822

Estimation of temperature detection delay in a fiber optic gyroscope sensing coil**Daniil S. Smirnov¹, Ivan G. Deyneka², Danila R. Devetyarov³, Philipp V. Skliarov⁴, Azamat B. Mukhtubayev⁵, Evgenii V. Vostrikov⁶**^{1,2,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^{3,4} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation¹ dsmirnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>² igdeyneka@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>³ ninyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4196-3260>⁴ skliarov.fil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1178-9476>⁵ Mukhtubayev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>⁶ e.v.vostrikov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>**Abstract**

The use of algorithmic temperature compensation requires that the external temperature sensor data and the thermal response of the fiber optic sensor should be synchronized. The paper considers an approach to estimate the temperature detection delay for the external temperature sensor in a sensing coil assembly of a fiber-optic gyroscope. The delay estimation is based on a cross-correlation of temperature data from an external temperature sensor and temperature data of an optical fiber segment obtained by distributed temperature measurement based on optical frequency reflectometry. The results include the estimation of temperature detection delay between the sensing coil and the temperature sensor. The described approach allows evaluating temperature detection delay in a sensing coil assembly of a fiber-optic gyroscope. In case of using multiple temperature sensors, the delay for each temperature sensor can be estimated and taken into account to improve the efficiency of the thermal drift compensation of the fiber optic gyroscope.

Keywords

fiber-optic sensors, fiber-optic reflectometry, temperature measurement, temperature detection delay, fiber-optic gyroscope

Acknowledgements

This work was done at ITMO University and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Agreement No. 075-11-2019-026 dated 27.11.2019, the project title: “The production development of fiber-optic gyroscopes for applications in measuring instruments and land vehicle systems”.

For citation: Smirnov D.S., Deyneka I.G., Devetyarov D.R., Skliarov Ph.V., Mukhtubayev A.B., Vostrikov E.V. Estimation of temperature detection delay in a fiber optic gyroscope sensing coil. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 817–822 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-817-822

Введение

Приборы на основе волоконно-оптических датчиков получили широкое распространение в последние десятилетия. Рост спроса и повышение требований к характеристикам таких приборов создают новые проблемы таких датчиков, одной из которых является снижение точностных характеристик приборов на их основе, вызванное изменением температуры окружающей среды.

Один из примеров таких приборов — волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), характеристики которого зависят от изменения температуры. Волоконно-оптический датчик измеряет угловую скорость вращения. Чувствительным элементом ВОГ является интерферометр Саньяка, который представляет собой замкнутый волоконно-оптический контур (ВОК). Одна из актуальных проблем ВОГ — так называемый тепловой дрейф. Под воздействием температуры окружающей среды показания прибора изменяются [1]. При этом изменение температуры чувствительного элемента (ЧЭ) ВОК — одна из причин теплового дрейфа сигнала ВОГ.

Для компенсации теплового дрейфа алгоритмическим путем выведен ряд зависимостей сигнала угловой скорости ВОГ (далее — сигнал ВОГ) от температуры окружающей среды [2–6]. В работах [4, 7] приведены примеры применения алгоритмической компенсации сигнала ВОГ. При этом на участках изменения тем-

пературы окружающей среды с высокой скоростью (градусы в минуту) заметны выбросы в сигнале ВОГ, обусловленные в том числе задержкой детектирования температуры ЧЭ ВОГ. Проблема задержки детектирования температуры ЧЭ внешним датчиком температуры и ее определения методом подбора рассмотрена в работе [8], где авторы исследуют конструкцию, в составе которой установлен только один датчик температуры, расположенный вне ВОК.

Для оценки задержки детектирования температуры необходимо знать температуру волокна ЧЭ ВОГ. Согласно литературе [9, 10], наиболее применимые методы измерения температуры оптического волокна — на основе рефлектометрии.

В настоящей работе рассмотрен подход к оценке задержки детектирования температуры ЧЭ ВОГ с использованием внешнего датчика температуры.

Особенности измерения температуры с применением рефлектометра

Один из наиболее актуальных способов распределенного измерения температуры оптического волокна — частотная рефлектометрия (OFDR), основанная на явлении рассеяния Рэлея [11]. Распределенное измерение температуры может быть представлено как измерение с использованием массива линейных датчиков температуры, расположенных в сегментах оптического

волокна. Благодаря развитию технологической базы современные частотные оптические рефлектометры позволяют измерять распределение температуры вдоль оптического волокна с пространственным разрешением до 1 мм [12] на расстоянии до нескольких километров [13]. При этом изменении сигнал, связанный с изменением температуры волокна от его деформации, разделяется [14].

Особенность измерения температуры волокна методами рефлектометрии — его относительность. Методы на основе рассеяния Рэлея позволяют определять изменение распределения температуры вдоль волокна, но не определять абсолютное значение температуры. Так, рефлектометр Luna OBR 4600 (Luna Technologies) определяет изменение температуры волокна относительно первой записанной рефлектограммы [12]. Примеры распределенного измерения температуры вдоль оптического волокна, полученные с применением OFDR-рефлектометра, представлены в работе [15].

Описание предлагаемого метода измерения задержки детектирования с помощью рефлектометра

Рассмотрим оценку задержки детектирования температуры для конструкции ВОК, представленной на рис. 1. Одномодовое оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4, выполненное по требованиям ТУ ЯЕИЛ.48-2008 [16], было уложено на бобину, изготовленную из стали, квадрупольной намоткой. Для обеспечения монолитности конструкции в процессе намотки волокно покрывалось компаундом [17]. Для снижения пространственных температурных градиентов [18] в конструкции ВОК по внутреннему и по внешнему диаметрам уложены слои дополнительного буферного волокна.

Типовые размеры ВОК составляют: диаметр катушки 150 мм, высота — 45 мм [19]. В качестве измерителя температуры использован платиновый датчик Pt1000 [20]. Термодатчики в конструкции ВОК размещены на поверхности компаунда, толщина которого может достигать 1 мм.

Схема экспериментального стенда для оценки времени задержки регистрации теплового воздействия показана на рис. 2.

В эксперименте использован рефлектометр Luna OBR 4600 (Luna Technologies). Испытуемый ВОК

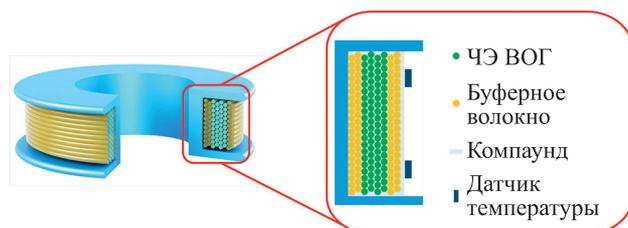


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического контура: внешний вид (а) и вид в разрезе с датчиками температуры (б)

Fig. 1. FOC appearance (a) and a cut view with temperature sensors (b)

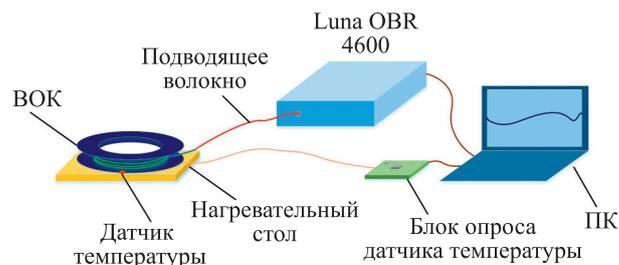


Рис. 2. Схема измерения задержки детектирования температуры с использованием рефлектометра

Fig. 2. Experimental setup for the estimation of temperature detection delay

установлен на подогреваемом столике, обеспечивающем нагрев от 25 до 40 °С.

Измерения температуры с одновременной регистрацией рефлектограммы выполнены на внешнем периоде ВОК (рис. 1) при следующих условиях: период опроса термодатчика в течение 0,5 с; длительность снятия рефлектограммы — 6 с. Этапы снятия измерений: выдержка при комнатной температуре (25 °С) в течение 10 мин; нагрев до температуры 40 °С со скоростью 4 °С/мин; выдержка при температуре 40 °С — 50 мин.

Результаты эксперимента и их анализ

Пример распределения температуры в оптическом волокне, полученного с применением OFDR-рефлектометра, представлен на рис. 3.

Распределение температуры в подводящем отрезке волокна обозначено красным цветом, распределение температуры на отрезке волокна между катушкой и подводящим волокном (синий цвет). В месте сварного соединения наблюдается «выброс» сигнала. Зеленым цветом показано распределение температуры в катуш-

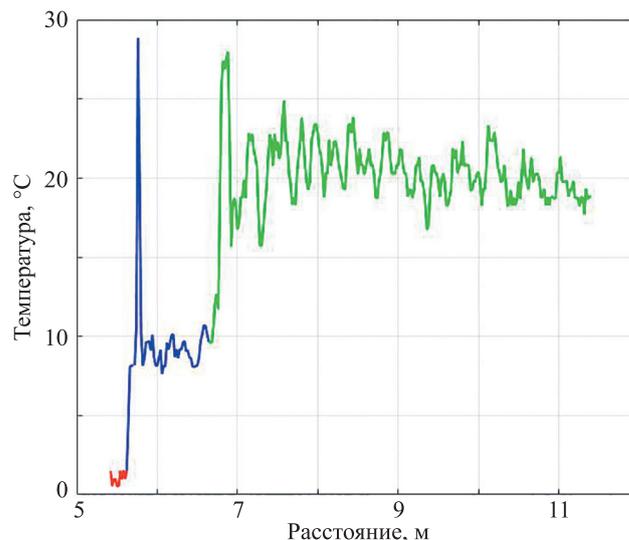


Рис. 3. График распределения температуры в оптическом волокне, полученный с применением OFDR-рефлектометра в процессе нагрева волоконно-оптического контура

Fig. 3. Temperature distribution in an optical fiber, obtained with an OFDR during the heating of the fiber coil

ке волокна, находящейся в контакте с нагревательным элементом.

Регистрируемая с помощью прибора Luna OBR 4600 рефлектограмма содержит информацию о температуре подводящего волокна, что должно быть учтено при сопоставлении данных о температуре, полученных рефлектометром, и данных, полученных с термодатчиков.

С учетом информации о длине подводящего волокна, методе намотки и диаметре ВОК выбран сегмент волокна, расположенный в наружном витке, поверх которого на компаунде установлен внешний датчик температуры. Сопоставление данных термодатчиков и участка соответствующего сегмента волокна показано на рис. 4.

Выполним на основании проведенных исследований оценку задержки детектирования температуры с помощью коэффициента корреляции Пирсона:

$$\rho(T_r, T_s) = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{r,i} - \bar{T}_r)(T_{s,i} - \bar{T}_s)}{\left\{ \sum_{i=1}^n (T_{r,i} - \bar{T}_r)^2 \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - \bar{T}_s)^2 \right\}^{1/2}},$$

где $\rho(T_r, T_s)$ — коэффициент корреляции между данными температуры, полученными рефлектометром (T_r) и данными, полученными внешним датчиком температуры (T_s); $T_{r,i}, T_{s,i}$ — ряды данных о температуре; \bar{T}_r, \bar{T}_s — средние выборки; n — длина выборки.

Величина коэффициента корреляции максимальна при сдвиге, равном времени задержки детектирования температуры внешним датчиком относительно температуры волокна. Взаимокорреляционная функция температур представлена на рис. 5.

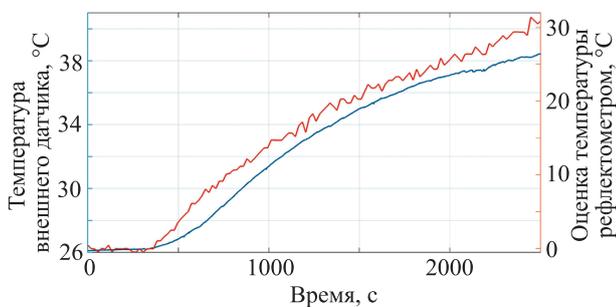


Рис. 4. Результат измерения температуры внешним датчиком температуры (синий цвет) и данных температуры сегмента наружного витка волокна, полученных рефлектометром (оранжевый цвет)

Fig. 4. Temperature from an external sensor (blue) and from a fiber segment (red)

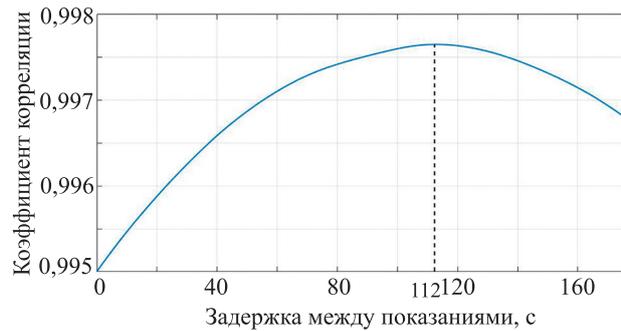


Рис. 5. Взаимокорреляционная функция показаний температур, полученных рефлектометром и внешним датчиком

Fig. 5. Cross-correlation between temperature from the external sensor and fiber segment

Анализ взаимокорреляционной функции свидетельствует о том, что существует задержка 112 с между детектированными величинами температуры. С учетом периода опроса температурных датчиков абсолютная погрешность составляет $\pm 6,5$ с. Полученное значение соответствует конкретной конфигурации ВОК и датчику температуры. Предложенный подход может быть применен для оценки задержки других конфигураций ВОК.

Заключение

В работе рассмотрен подход к оценке задержки детектирования температуры оптического волокна чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа внешними датчиками температуры. Подход заключается в одновременном измерении температуры сегмента оптического волокна с использованием частотного рефлектометра и температуры внешнего датчика с последующим корреляционным анализом полученных данных. Высокая пространственная разрешающая способность OFDR-рефлектометра позволяет измерить температуру сегмента волокна, находящегося на расстоянии, равном толщине компаунда от внешнего термодатчика, что дает возможность оценить задержку детектирования температуры для каждого из них в отдельности. Результаты работы могут быть использованы для увеличения эффективности компенсации теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, особенно при высоких скоростях изменения температуры окружающей среды.

Литература

1. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston: Artech House, 2014. 416 p.
2. Савин М.А. Математическое моделирование дрейфа волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних воздействий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2018 [Электронный ресурс]. URL: https://pstu.ru/files/2/file/adm/dissertacii/savin/diss_SavinMA_red25072018.pdf свободный. Яз. рус. (дата обращения: 22.10.2021).
3. Nikiforovskii D., Smirnov D., Deyneka I., Nikitenko A., Rupasov A. The investigation of FOG output signal dependency on environment temperature at high rates of temperature change // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1864. N 1. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012009>
4. Климкович Б.В. Влияние случайной погрешности температурных датчиков на качество температурной компенсации смещения нуля ВОГ нейронной сетью // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 4. С. 53–70. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0049>
5. Wang G., Wang O., Zhao B., Wang Z. Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine // *Applied Optics*. 2016. V. 55. N 5. P. 1061–1066. <https://doi.org/10.1364/ao.55.001061>
6. Jianli L., Feng J., Jiancheng F., Junchao C. Temperature error modeling of RLG based on neural network optimized by pso and regularization // *IEEE Sensors Journal*. 2014. V. 14. N 3. P. 912–919. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2290699>
7. Вахрамеев Е.И., Галыгин К.С., Ивонин А.С., Ошивалов М.А. Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 1. С. 32–38. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-1-32-38>
8. Wei X.-T., Liu Y.-Y., Yang G.-L., Zhang W. Analysis of time delay in modeling and compensation of temperature error for FOG // *Proc. of the International Conference on Energy Development and Environmental Protection (EDEP)*. 2016. P. 159–165. <https://doi.org/10.12783/dteees/edep2016/5891>
9. Smirnov D., Deyneka I., Kulikov A., Strigalev V., Meshkovsky I. Methods for studying temperature characteristics of a FOG sensing coil // *Proc. of the 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2021)*. 2021. P. 27–28. <https://doi.org/10.23919/icins43216.2021.9470869>
10. Feng W., Shi H., Xu B., Ding D. Multi-factor fiber coil temperature distribution model of FOG based on distributed fiber temperature sensor // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10460. P. 104601H. <https://doi.org/10.1117/12.2285247>
11. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpenev B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective // *Applied Physics Reviews*. 2019. V. 6. N 4. P. 041302. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
12. Luna Technologies. OBR 4600 Optical Backscatter Reflectometer [Электронный ресурс]. URL: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/LUNA-Data-Sheet-OBR-4600-V2.pdf> (дата обращения: 22.10.2021).
13. Ito F., Fan X., Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation // *Journal of Lightwave Technology*. 2012. V. 30. N 8. P. 1015–1024. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2167598>
14. Froggatt M.E. Distributed strain and temperature discrimination in polarization maintaining fiber. Patent US7538883B2. 2009.
15. Roman M., Balogun D., Zhuang Y., Gerald R.E., II, Bartlett L., O'malley R.J., Huang J. A spatially distributed fiber-optic temperature sensor for applications in the steel industry // *Sensors (Switzerland)*. 2020. V. 20. N 14. P. 3900. <https://doi.org/10.3390/s20143900>
16. Мухтубаев А.Б. Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Университет ИТМО. СПб., 2020 [Электронный ресурс]. URL: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=6F1DE8633558BE5ACD4EC3B79AE202EE, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 22.10.2021).
17. Новиков Р.И. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени кан-

References

1. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston: Artech House, 2014. 416 p.
2. Savin M.A. *Mathematical modeling of the drift of a fiber-optic gyroscope under external influence*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2018. Available at: https://pstu.ru/files/2/file/adm/dissertacii/savin/diss_SavinMA_red25072018.pdf (accessed: 22.10.2021). (in Russian)
3. Nikiforovskii D., Smirnov D., Deyneka I., Nikitenko A., Rupasov A. The investigation of FOG output signal dependency on environment temperature at high rates of temperature change. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012009>
4. Klimkovich B.V. Effect of Random Error of Temperature Sensors on the Quality of Temperature Compensation of FOG Bias by a Neural Network. *GyroscoPy and Navigation*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 27–37. <https://doi.org/10.1134/S2075108721010089>
5. Wang G., Wang O., Zhao B., Wang Z. Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 5, pp. 1061–1066. <https://doi.org/10.1364/ao.55.001061>
6. Jianli L., Feng J., Jiancheng F., Junchao C. Temperature error modeling of RLG based on neural network optimized by pso and regularization. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 912–919. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2290699>
7. Vahrameev E.I., Galyagin K.S., Oshivalov M.A., Savin M.A. Method of numerical prediction and correction of thermal drift of the fiber-optic gyro. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 32–38. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-1-32-38>
8. Wei X.-T., Liu Y.-Y., Yang G.-L., Zhang W. Analysis of time delay in modeling and compensation of temperature error for FOG. *Proc. of the International Conference on Energy Development and Environmental Protection (EDEP)*, 2016, pp. 159–165. <https://doi.org/10.12783/dteees/edep2016/5891>
9. Smirnov D., Deyneka I., Kulikov A., Strigalev V., Meshkovsky I. Methods for studying temperature characteristics of a FOG sensing coil. *Proc. of the 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2021)*, 2021, pp. 27–28. <https://doi.org/10.23919/icins43216.2021.9470869>
10. Feng W., Shi H., Xu B., Ding D. Multi-factor fiber coil temperature distribution model of FOG based on distributed fiber temperature sensor. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10460, pp. 104601H. <https://doi.org/10.1117/12.2285247>
11. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpenev B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. *Applied Physics Reviews*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 041302. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
12. Luna Technologies. OBR 4600 Optical Backscatter Reflectometer. Available at: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/LUNA-Data-Sheet-OBR-4600-V2.pdf> (accessed: 22.10.2021).
13. Ito F., Fan X., Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, no. 8, pp. 1015–1024. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2167598>
14. Froggatt M.E. Distributed strain and temperature discrimination in polarization maintaining fiber. Patent US7538883B2, 2009.
15. Roman M., Balogun D., Zhuang Y., Gerald R.E., II, Bartlett L., O'malley R.J., Huang J. A spatially distributed fiber-optic temperature sensor for applications in the steel industry. *Sensors (Switzerland)*, 2020, vol. 20, no. 14, pp. 3900. <https://doi.org/10.3390/s20143900>
16. Mukhtubaev A.B. *The polarization cross-coupling influence on the Sagnac phase shift in a fiber-optic gyroscope*. Academic dissertation candidate of engineering. St. Petersburg, ITMO University, 2020. Available at: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=6F1DE8633558BE5ACD4EC3B79AE202EE (accessed: 22.10.2021). (in Russian)
17. Nonikov R.L. *Technological Equipment and Quality Improvement Methods of Fiber Loop Winding for Fiber-Optic Gyroscope*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2014. Available at: [r u / ? p a g e 1 = 1 6 & p a g e 2 = 8 6 & n u m b e r _](http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_)

- дидата технических наук / НИУ ИТМО. СПб., 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=5B9F43C6ABB5A25253C8F251731F87E1, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 22.10.2021).
18. Zhang Z., Yu F. Analysis for the thermal performance of a modified quadrupolar fiber coil // *Optical Engineering*. 2018. V. 57. N 1. P. 017109. <https://doi.org/10.1117/1.oe.57.1.017109>
 19. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // *Гироскопия и навигация*. 2017. Т. 25. № 3. С. 78–85. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2017.25.3.078-085>
 20. Рупасов А.В. Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / НИУ ИТМО. СПб., 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=03FA365A54B1D83E9595BF5311453B5D, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 22.10.2021).

Авторы

Смирнов Даниил Сергеевич — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirnov@itmo.ru

Дейнека Иван Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603305268](https://orcid.org/0000-0003-1557-8035), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>, igdeynea@itmo.ru

Девятьяров Данила Ренатович — младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57213149643](https://orcid.org/0000-0003-4196-3260), <https://orcid.org/0000-0003-4196-3260>, nineyarov@mail.ru

Скляр Филлип Владимирович — начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57195913612](https://orcid.org/0000-0003-1178-9476), <https://orcid.org/0000-0003-1178-9476>, sklyarov.fil@gmail.com

Мухтубаев Азамат Булатович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195632244](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), [57198779748](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, Mukhtubaev.ab@gmail.com

Востриков Евгений Владимирович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, e.v.vostrikov@yandex.ru

Authors

Daniil S. Smirnov — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirnov@itmo.ru

Ivan G. Deyneka — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603305268](https://orcid.org/0000-0003-1557-8035), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>, igdeynea@itmo.ru

Danila R. Devetyarov — Junior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57213149643](https://orcid.org/0000-0003-4196-3260), <https://orcid.org/0000-0003-4196-3260>, nineyarov@mail.ru

Philipp V. Skliarov — Head of Department, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57195913612](https://orcid.org/0000-0003-1178-9476), <https://orcid.org/0000-0003-1178-9476>, sklyarov.fil@gmail.com

Azamat B. Mukhtubayev — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195632244](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), [57198779748](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, Mukhtubaev.ab@gmail.com

Evgenii V. Vostrikov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, e.v.vostrikov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 04.10.2021

Одобрена после рецензирования 23.10.2021

Принята к печати 30.11.2021

Received 04.10.2021

Approved after reviewing 23.10.2021

Accepted 30.11.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»