

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-35-49

УДК 531.383, 53.096

Метод определения коэффициента температурной чувствительности контура волоконно-оптического гироскопа

Григорий Константинович Погудин^{1✉}, Артём Сергеевич Алейник²,
Александр Николаевич Никитенко³, Илья Романович Арцер⁴,
Владимир Евгеньевич Стригалёв⁵, Вадим Сергеевич Ошлаков⁶,
Сергей Александрович Волковский⁷, Даниил Сергеевич Смирнов⁸,
Ида Леонидовна Кубланова⁹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹gkpogudin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>

²artemal@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

³anikitenko@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2441-473X>

⁴irartser@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-4018-162X>

⁵vstrglv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

⁶vsoshlakov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>

⁷savolkovskii@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁸dsmirnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

⁹cubeida@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>

Аннотация

Предмет исследования. Коэффициент температурной чувствительности контура волоконно-оптического гироскопа. **Цель работы.** Создание и проверка метода определения механической и оптической составляющих коэффициента температурной зависимости масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа. **Метод.** Используется алгоритм для определения коэффициента температурной зависимости масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа экспериментально и расчётный метод вычисления коэффициента температурной чувствительности волоконно-оптического контура. **Основные результаты.** Разработан метод определения коэффициента температурной чувствительности контура волоконно-оптического гироскопа. Экспериментально подтверждена взаимозависимость коэффициента температурной зависимости средневзвешенной по частоте центральной длины волны спектра выходного излучения эрбиевого суперлюминесцентного источника, коэффициента температурной зависимости масштабного коэффициента и коэффициента температурной чувствительности контура волоконно-оптического гироскопа. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут применяться при подборе параметров источника излучения под характеристики конкретного волоконно-оптического контура для компенсации величины коэффициента температурной чувствительности, а также для учёта значения коэффициента температурной чувствительности контура при миниатюризации и разработке его конструкции, макетировании и оценке характеристик производимых изделий в рамках производства. Кроме того, по данным исследования возможны разработка методики и создание измерительного стенда, необходимых для анализа температурных коэффициентов контуров в процессе их отбраковки или сортировки при изготовлении волоконно-оптического гироскопа.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, контур волоконно-оптического гироскопа, коэффициент температурной чувствительности, масштабный коэффициент волоконно-оптического гироскопа, эрбиевый суперлюминесцентный источник

Благодарность: авторы выражают благодарность АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» за предоставление доступа к оборудованию для проведения измерений. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Погудин Г.К., Алейник А.С., Никитенко А.Н., Арцер И.Р., Стригалёв В.Е., Ошлаков В.С., Волковский С.А., Смирнов Д.С., Кубланова И.Л. Метод определения коэффициента температурной чувствительности контура волоконно-оптического гироскопа // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 35–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-35-49>

Коды OCIS: 120.0120, 120.5790, 060.2800.

A method to estimate the thermal sensitivity coefficient of a fiber-optic gyroscope loop

GRIGORII K. POGUDIN¹✉, ARTEM S. ALEINIK², ALEXANDER N. NIKITENKO³,
ILIA R. ARTSER⁴, VLADIMIR E. STRIGALEV⁵, VADIM S. OSHLAKOV⁶,
SERGEI A. VOLKOVSKII⁷, DANIIL S. SMIRNOV⁸, IDA L. KUBLANOVA⁹

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

¹gkpogudin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>

²artemal@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

³anikitenko@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2441-473X>

⁴irartser@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-4018-162X>

⁵vstrglv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

⁶vsoshlakov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>

⁷savolkovskii@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁸dsmirnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

⁹cubeida@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>

Abstract

Subject of study. The thermal sensitivity coefficient of a fiber-optic gyroscope loop. **Aim of study.** The aim is to establish and verify a method for determining the mechanical and optical components of the temperature coefficient of the scale factor in a fiber-optic gyroscope. **Method.** An algorithm for determining the temperature coefficient of the scale factor in a fiber-optic gyroscope experimentally and a computational method for calculating the temperature coefficient of the fiber loop are used. **Main results.** A method for determining the thermal sensitivity coefficient of the fiber loop in a fiber-optic gyroscope has been developed. The dependency between the temperature coefficient of the scale factor in a fiber-optic gyroscope, the temperature coefficient of the central wavelength spectrum output radiation of an erbium-doped superluminescent fiber source, and the temperature coefficient of the fiber loop in a fiber-optic gyroscope has been experimentally confirmed. **Practical significance.** The findings of this research can be utilized to develop a testing setup and procedure for assessing the temperature coefficients of fiber loops for further selection or categorization during fiber-optic gyroscopes manufacturing, switching emission source parameters to match specific fiber loop characteristics for temperature coefficient compensation, and consideration of the temperature coefficient value of the fiber loop for its structural minimization as a result of the development and prototyping of novel fiber loop designs.

Keywords: fiber-optic gyroscope, fiber-optic gyroscope loop, thermal sensitivity coefficient, fiber-optic gyroscope scale factor, erbium-doped superluminescent fiber source

Acknowledgment: the authors express their gratitude to Concern CSRI Elektropribor, JSC for providing access to equipment for carrying out measurements. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project № FSER-2024-0006).

For citation: Pogudin G.K., Aleinik A.S., Nikitenko A.N., Artser I.R., Strigalev V.E., Oshlakov V.S., Volkovskii S.A., Smirnov D.S., Kublanova I.L. A method to estimate the thermal sensitivity coefficient of a fiber-optic gyroscope loop [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 8. P. 35–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-35-49>

OCIS codes: 120.0120, 120.5790, 060.2800.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) — оптико-электронный прибор для измерения угловой скорости, широко используемый в качестве чувствительного элемента в системах ориентации, стабилизации и навигации. Уникальная чувствительность ВОГ, которую можно достичь за счёт увеличения длины волоконного-оптического контура (ВОК), открывает широкие перспективы их использования в высокоточных инерциальных навигационных системах для точного позиционирования различных видов транспортных средств, в том числе в условиях, когда определение местоположения другими методами измерения затруднено [1–5].

В ВОГ навигационного класса точности, обеспечивающих погрешность определения угловой скорости менее 0,01 °/ч, применяются волоконные суперлюминесцентные источники оптического излучения, обладающие высокой стабильностью центральной длины волны. Такие источники изготавливаются на основе специальных волокон с добавлением редкоземельных элементов, подобранных в соответствии с требуемой спектральной областью излучения. Наиболее распространены эрбиевые суперлюминесцентные источники (ЭСИ) с величиной средневзвешенной по частоте центральной длины волны (СЦДВ) спектра излучения в области 1530–1570 нм [6].

В последние годы в исследованиях в области ЭСИ, предназначенных для использования ВОГ, акцент сделан на способах сокращения длины декогерентности и обеспечения температурной инвариантности излучения ЭСИ [7–11]. В большинстве таких работ авторы изучают температурную стабильность СЦДВ оптического излучения ЭСИ независимо от ВОГ, ставя основной целью минимизацию отклонения СЦДВ при изменении внешней тем-

пературы с помощью спектральных фильтров [8, 10–15]. При этом влияние снижения температурной зависимости СЦДВ на масштабный коэффициент (МК) ВОГ не анализируется.

МК ВОГ определяется оптической составляющей — центральной длиной волны λ спектра излучения источника в составе ВОГ, механической составляющей — диаметром ВОК D (в метрах) и длиной оптического волокна L (в метрах) [6]:

$$\mu(T) = \frac{2\pi L(T)D(T)}{c\lambda(T)}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, м/с. При использовании источника широкополосного оптического излучения со сложным несимметричным спектром, к которому относятся ЭСИ, в формуле (1) следует использовать значение СЦДВ [16].

Первые предложения по измерению и снижению нестабильности МК ВОГ были представлены ещё в 1989 году [17]. Значимые достижения в области улучшения стабильности МК до 38 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$) были представлены в работе [18], а в [19, 20] показана зависимость МК ВОГ от температуры окружающей среды. В одной из последних работ [21] представлен метод стабилизации МК путём учёта его зависимости как от внешней температуры, так и от скорости вращения, полученной на длительном интервале времени, что позволяет значительно повысить стабильность МК ВОГ.

Стоит отметить, что авторы публикаций по тематике температурной стабилизации МК ВОГ ссылаются на его основную зависимость от оптической составляющей (СЦДВ), но не указывают, что механическая составляющая (диаметр ВОК и его длина) также зависит от температуры и вносит свой вклад в итоговую погрешность. Поэтому даже при стабилиза-

ции СЦДВ ЭСИ итоговая зависимость МК ВОГ от температуры остаётся.

Таким образом, целью работы является создание и проверка метода определения механической и оптической составляющих коэффициента температурной зависимости масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа.

В данной работе выведена формула, описывающая взаимосвязь КТЗ МК ВОГ, коэффициента температурной чувствительности (КТЧ) ВОГ гироскопа и КТЗ СЦДВ спектра излучения ЭСИ, а также экспериментально получены значения температурных коэффициентов, подтверждающие достоверность предложенного метода.

МАСШТАБНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Угловая скорость, регистрируемая ВОГ, определяется величиной полуволнового напряжения U_π фазового модулятора многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС), используемой в оптической схеме ВОГ [22]:

$$\Omega_{\text{FOG}}(T, t) = \mu_U(T) \Delta U(t), \quad (2)$$

где $\Delta U(t)$ — подаваемое на фазовый модулятор напряжение, В, а

$$\mu_U(T) = \frac{\lambda(T)c}{L(T)D(T)} \frac{1}{2U_\pi(T)}. \quad (3)$$

В исследуемом ВОГ регистрация сигнала угловой скорости проводилась при одновременном функционировании второй обратной связи [23] и метода автоподстройки U_π с погрешностью менее $0,1$ млн $^{-1}/^\circ\text{C}$ или метода компенсации U_π путём аппроксимации полученной на этапе калибровки ВОГ зависимости $U_\pi(T)$ функцией $U_\pi(T) = aT^2 + bT + c$ с коэффициентами a, b, c [2, 22, 24].

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВОГО СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИСТОЧНИКА

Волоконно-оптический тракт (ВОТ) ВОГ обладает незначительной спектральной селективностью, что в диапазоне температур может приводить к спектрально-зависимым потерям

Таблица 1. Характерные величины температурных коэффициентов k_{EDFS}
Table 1. Typical temperature coefficients k_{EDFS} values

k_{EDFS} , млн $^{-1}/^\circ\text{C}$	Модель	Диапазон температур, $^\circ\text{C}$
2	SFS-1550-PM-FA-10	от -45 до 71
3	ESS-30	от 0 до 45
6	LC-ASE-C-10	от -40 до 60
18	ErBBLs-35-CF	от 0 до 45

и исказить спектр прошедшего через ВОТ оптического излучения, а также влиять на КТЗ СЦДВ выходного излучения ЭСИ. Величина КТЗ СЦДВ спектра на выходе ВОТ ВОГ складывается из нескольких составляющих [22, 26]:

$$k_\lambda = k_{\text{EDFS}} + k_{t\text{FOG}} + k_{tF}, \quad (4)$$

где k_{EDFS} — КТЗ СЦДВ спектра излучения на выходе ЭСИ, $k_{t\text{FOG}}$ — коэффициент, определяемый зависимостью оптических параметров ВОТ ВОГ от температуры, k_λ — КТЗ СЦДВ спектра на выходе ВОТ ВОГ, k_{tF} — КТЗ спектра пропускания фильтра, устанавливаемого в ВОТ ВОГ или на выходе ЭСИ.

Коэффициент k_{EDFS} определяется зависимостью мощности лазерных диодов накачки и их центральной длины волны, а также спектральных характеристик активного эрбиевого волокна от температуры.

Далее в экспериментальной части работы показано, что величина коэффициента k_λ отличается от k_{EDFS} на десятки млн $^{-1}/^\circ\text{C}$, так как излучение источника проходит весь ВОТ ВОГ, прежде чем попадёт на фотоприёмник.

В табл. 1 представлены типичные величины КТЗ k_{EDFS} спектра излучения некоторых моделей ЭСИ.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Обозначим произведение в числителе формулы (1) для МК ВОГ с помощью условной площади ВОК $S(T) = L(T)D(T)$. Тогда выражение для МК примет вид:

$$\mu(T) = \frac{2\pi}{c} \frac{S(T)}{\lambda(T)} = \mu(T_0)(k_\mu(T - T_0) + 1), \quad (5)$$

где k_μ — КТЗ МК ВОГ, T и T_0 — температуры, при которых проводилось измерение сигнала угловой скорости ВОГ, $\mu(T_0)$ — значение МК при температуре T_0 :

$$\mu(T_0) = \frac{2\pi S(T_0)}{c \lambda(T_0)}. \quad (6)$$

Вычислим производную от МК по температуре:

$$\mu'(T) = \frac{2\pi S'(T)\lambda(T) - S(T)\lambda'(T)}{c \lambda^2(T)} = \mu(T_0)k_\mu. \quad (7)$$

$$\mu'(T) = \frac{2\pi S(T_0)k_S\lambda(T_0)(k_\lambda(T - T_0) + 1) - \lambda(T_0)k_\lambda S(T_0)(k_S(T - T_0) + 1)}{c (\lambda(T_0)(k_\lambda(T - T_0) + 1))^2}. \quad (9)$$

Упростим полученное выражение:

$$\mu'(T) = \frac{2\pi S(T_0)\lambda(T_0)(k_S - k_\lambda)}{c \lambda^2(T_0)(k_\lambda(T - T_0) + 1)^2}. \quad (10)$$

Возьмём в качестве T_0 значение температуры, соответствующее середине рабочего температурного диапазона исследуемого в работе прибора: $T_0 = 0$ °С. Допустим, что измерения также проводятся при температуре $T = 0$ °С, тогда выражение (10) упрощается:

$$\mu'(0) = \frac{2\pi S(0)(k_S - k_\lambda)}{c \lambda(0)}. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим k_S :

$$k_S = \frac{\tilde{n}\lambda(0)}{2\pi S(0)}\mu'(0) + k_\lambda = \frac{\mu'(0)}{\mu(0)} + k_\lambda = k_\mu + k_\lambda. \quad (12)$$

Таким образом, для минимизации КТЗ МК ВОГ k_μ КТЗ СЦДВ спектра источника излучения k_λ должен быть равен и противоположен по знаку КТЧ ВОК k_S . Рассматривая k_μ как разность температурных коэффициентов механической и оптической составляющих и принимая во внимание (4), можно заключить, что механическая составляющая (КТЧ ВОК) может быть также скомпенсирована подбором спектрального фильтра в оптической схеме ЭСИ или ВОТ ВОГ.

Механизм воздействия изменения температуры на ВОК более сложный и, помимо теплового расширения, приводит к возникновению

Зависимость длины волны и площади ВОК от температуры можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} \lambda(T) = \lambda(T_0)(k_\lambda(T - T_0) + 1) \\ S(T) = S(T_0)(k_S(T - T_0) + 1) \end{cases}. \quad (8)$$

В системе (8) k_λ — КТЗ центральной длины волны спектра источника излучения на выходе ВОТ ВОГ, k_S — КТЧ контура ВОГ. Подставим переменные из системы (8) в выражение (7):

термоиндуцированной и эластооптической составляющих смещения нуля выходного сигнала ВОГ, а также к изменению пространственного положения оси чувствительности ВОГ относительно катушки, однако в данной работе отклонение оси чувствительности ВОГ не рассматривается.

При оценке расчётным методом [6] КТЧ ВОК составляет от 8 до 10 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Оценка приводится для катушки из волокна диаметром 80 мкм с покрытием 160 мкм, длина которого при воздействии температуры изменяется на величину от 4 до 5 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Во втором методе [25] использовался оптический рефлектометр в частотной области Luna OBR (Optical Backscatter Reflectometer) 4600. В катушку, изготовленную методом квадрупольной намотки из волокна с диаметром покрытия 128 мкм и длиной 400 метров, вводился формируемый рефлектометром сигнал, показывающий изменение длины волокна в катушке под действием температуры, которое в исследуемой катушке составило от 1 до 4 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 0 °С до 80 °С. Изменение длины катушки пересчитано по формуле [6] в КТЧ ВОК

$$k_S = \frac{dS}{SdT} = \frac{2dL}{LdT}, \quad (13)$$

который составил от 2 до 8 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Полученные двумя методами данные приведены к общему виду и представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характерные величины КТЧ k_S волоконно-оптического контура ВОГ
Table 2. Typical temperature coefficient values of the FOG fiber-optic loop

Метод	k_S , млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$
Расчётный	от 8 до 10
Оптическая рефлектометрия в частотной области (R-OFDR)	от 2 до 8

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Методика определения КТЗ МК ВОГ при фиксированном значении КТЗ СЦДВ спектра излучения источника может быть представлена в виде следующего алгоритма:

1. Размещение ВОГ с источником на поворотном столе внутри термокамеры.
2. Повышение температуры в термокамере до максимального рабочего значения ВОГ.
3. Выбор одного из режимов работы источника с известным КТЗ СЦДВ спектра излучения.
4. Установка полуволнового напряжения фазового модулятора методом автоподстройки или подстройки по температуре.
5. Начало цикла вращений системы на поворотном столе при достижении установленной температуры. Цикл подбирается таким образом, чтобы вращение ВОГ происходило как на положительных, так и на отрицательных скоростях, равных по модулю, за счёт чего осуществляется компенсация смещения (погрешности) нуля выходного сигнала ВОГ. В процессе вращения осуществляется запись показаний детектируемой скорости. Фиксируемый сигнал должен соответствовать полному числу оборотов.
6. Повторение п. 3–5 с выбранным шагом по температуре до достижения минимальной рабочей температуры ВОГ.
7. Определение отклонения скорости, детектируемой ВОГ, от реальной скорости вращения поворотного стола при каждой температуре путём аппроксимации зависимости Ω_{FOG} от Ω_{rot} линейной функцией $y = kx + b$, где k и b — коэффициенты аппроксимации.
8. За счёт подобранного цикла вращения в п. 5 из данных полученной скорости можно вычесть проекцию скорости вращения Земли

Таблица 3. Параметры исследуемого волоконного контура ВОГ
Table 3. Parameters of the FOG fiber-optic loop under study

Параметр	Значение
Среднее значение диаметра D катушки с волокном	0,128 м
Длина волокна L	2000 м

(смещение b функции y), и тогда МК ВОГ — это наклон k функции y или результат деления средней детектируемой ВОГ скорости $\bar{\Omega}_{\text{FOG}}$ на постоянную скорость вращения поворотного стола Ω_{rot} :

$$\mu = \frac{\bar{\Omega}_{\text{FOG}}}{\Omega_{\text{rot}}}. \quad (14)$$

9. Расчёт КТЗ МК ВОГ по формуле:

$$k_{\mu} = \frac{\mu_{T2} - \mu_{T1}}{\mu_{T1} \Delta T} 10^6, \quad (15)$$

где $T1$, $T2$ — температуры в термокамере, при которых регистрировался сигнал угловой скорости ВОГ, причём $T2 > T1$, $\Delta T = T2 - T1$, μ_{T2} — масштабный коэффициент ВОГ при температуре $T2$, μ_{T1} — масштабный коэффициент ВОГ при температуре $T1$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

В качестве исследуемого устройства использовался опытный образец ВОГ с замкнутым контуром и частотой выдачи сигнала угловой скорости 100 Гц (рис. 1). Параметры ВОГ ВОГ перечислены в табл. 3. В оптическую схему ВОГ был интегрирован ЭСИ с возможностью регулировки выходной мощности и СЦДВ спектра излучения за счёт изменения соотношения мощностей накачки лазерных диодов, т.е. коэффициента накачки K_R в оптической схеме ЭСИ [26].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВОГО СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИСТОЧНИКА

Для получения информации о КТЗ СЦДВ измерялись спектр и мощность излучения ЭСИ

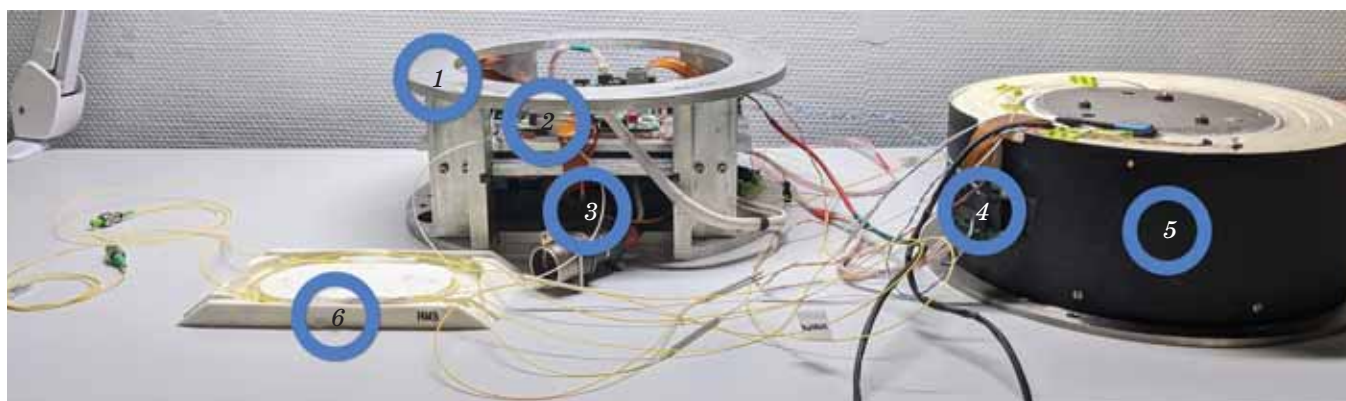


Рис. 1. Фотография исследуемого ВОГ. На фотографии цифрами обозначены 1 — кронштейн; 2 — электронная часть ВОГ; 3 — ЭСИ; 4 — плата термометрии; 5 — кожух ВОГ, содержащий МИОС, X-разветвитель, поляризатор и волоконно-оптический контур; 6 — кассета с Y-разветвителями для контроля мощности в оптическом тракте ВОГ

Fig. 1. Photograph of the investigated FOG. The following components are labeled by numbers in the photograph: 1 — mounting bracket; 2 — electronic part of the FOG; 3 — EDS; 4 — thermometry board; 5 — FOG housing containing MIOC, X-splitter, polarizer, and fiber-optic loop; 6 — cassette with Y-splitters for monitoring power in the optical path of the FOG

как показано на схеме (рис. 2). При этом ЭСИ и электронный блок обработки ВОГ на кронштейне помещались в испытательную камеру тепла/холода (КТХ) КТХ-150, а кожух с ВОГ — на стол рядом с КТХ.

Для измерения выходной мощности ЭСИ десятипроцентный порт Y-разветвителя «А» подключался к фотоприёмнику Thorlabs S144C с блоком управления PM200 с выбранным диапазоном измерений в области длины волны 1550 нм. Для регистрации спектров десятипроцентные порты Y-разветвителя «А» и Y-разветвителя «В» по очереди подключались к оптическому анализатору спектра Anritsu MS9740B.

Измерения проводились при температурах плюс 50 °С и минус 50 °С. По достижении теплового равновесия в КТХ выходная мощность ЭСИ устанавливалась равной 5 мВт, а коэффициент накачки менялся от 0,45 до 0,8 с шагом 0,05. Затем измерения повторялись для выходной мощности 7 мВт. При этом записывались спектры выходного излучения ЭСИ, из которых для дальнейшей работы была выделена группа, изображённая на рис. 3.

Пунктирными линиями обозначены спектры излучения при интегральной выходной мощности излучения ЭСИ 5 мВт, сплошными линиями — при мощности 7 мВт. Всего были

определены шесть режимов работы ЭСИ, отличающихся величиной СЦДВ спектра излучения, находящейся в диапазоне от 1563,940 нм до 1566,432 нм. Значение СЦДВ рассчитано по формуле:

$$\bar{\lambda} = c \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P(f_i) f_i)}{\sum_{i=1}^n P(f_i)} \right)^{-1}, \quad (16)$$

где $f_i = c/\lambda_i$ — частота оптического излучения в выходном спектре ЭСИ (частота f_1 соответствует наибольшей длине волны измеренного спектра, а f_n — наименьшей длине волны), $P(f_i)$ — мощность в мВт, соответствующая частоте f_i .

Далее расчётным путём определены значения КТЗ СЦДВ излучения ЭСИ, прошедшего через ВОГ ВОГ (табл. 4):

$$k_\lambda = \frac{\bar{\lambda}_{T2} - \bar{\lambda}_{T1}}{\bar{\lambda}_{T1} \Delta T} 10^6, \quad (17)$$

где $T1$, $T2$ — температуры в КТХ, при которых записывался спектр излучения ЭСИ, причём $T2 > T1$, $\Delta T = T2 - T1$, $\bar{\lambda}_{T2}$ — СЦДВ спектра излучения ЭСИ, прошедшего через ВОГ ВОГ, при температуре $T2$, $\bar{\lambda}_{T1}$ — СЦДВ спектра излучения ЭСИ, прошедшего через ВОГ ВОГ, при температуре $T1$.

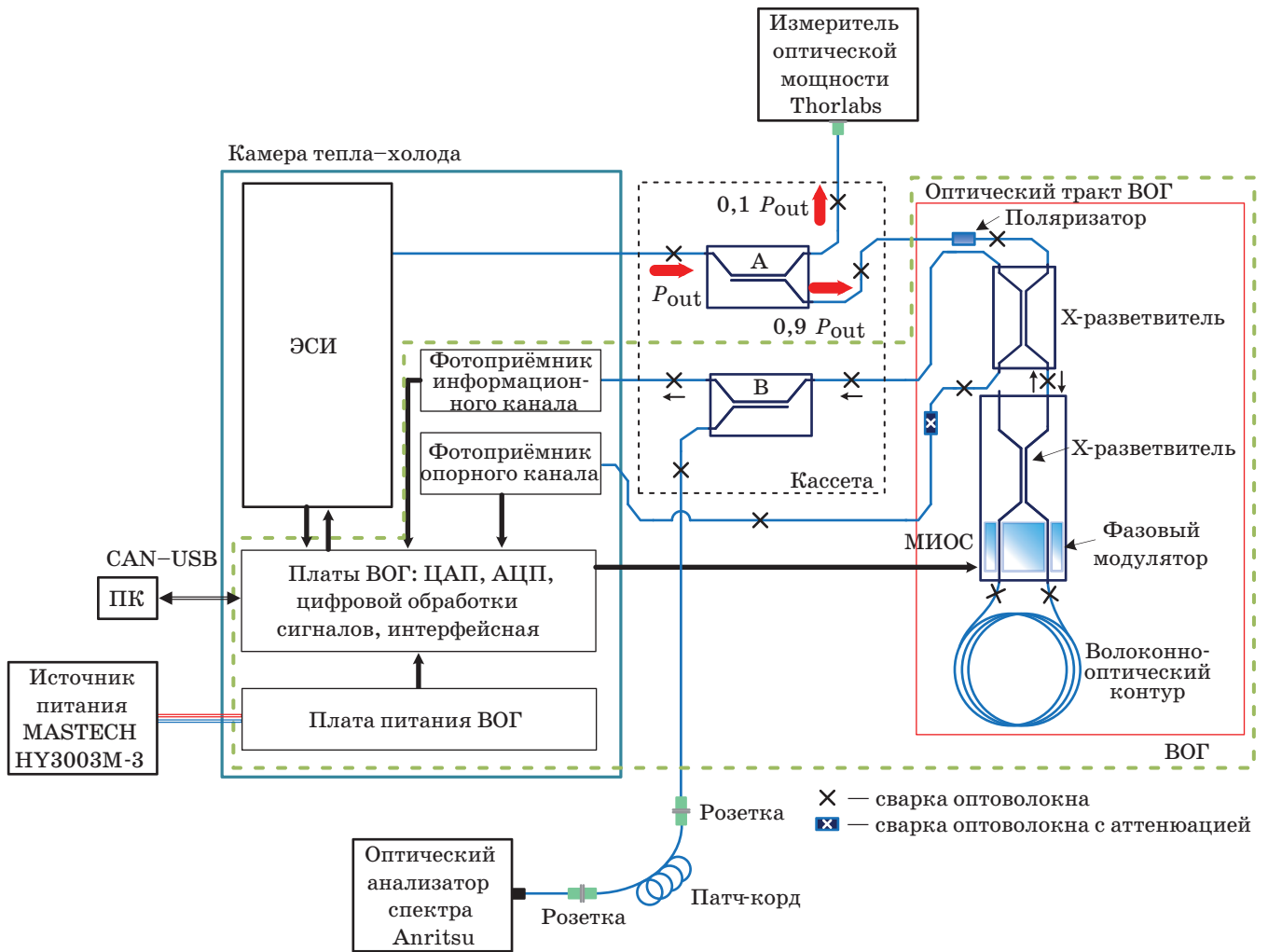


Рис. 2. Схема измерения спектров и мощности излучения эрбиевого суперлюминесцентного источника. ВОГ — волоконно-оптический гироскоп; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер; МИОС — multifunctional integrated optical chip; ЭСИ — эрбиевый суперлюминесцентный источник; P_{out} — выходная оптическая мощность; A, B — сплавной оптический разветвитель с конфигурацией портов 1×2 и коэффициентом деления мощности 90/10

Fig. 2. Scheme for measuring spectra and power of erbium-doped fiber source optical emission: ВОГ (FOG) — fiber-optic gyroscope; ЦАП (DAC) — digital-to-analog converter; АЦП (ADC) — analog-to-digital converter; ПК (PC) — personal computer; МИОС (MIOC) — multifunctional integrated optical chip; ЭСИ (EDFS) — erbium-doped fiber source; P_{out} — output optical power; A, B — fused optical coupler with 1×2 ports and 90/10 power split ratio

Кроме того, были рассчитаны значения КТЗ СЦДВ спектра выходного излучения ЭСИ

$$k_{EDFS} = \frac{\bar{\lambda}_{EDFS T2} - \bar{\lambda}_{EDFS T1}}{\bar{\lambda}_{EDFS T1} \Delta T} 10^6, \quad (18)$$

где $\bar{\lambda}_{EDFS T2}$ — СЦДВ спектра выходного излучения ЭСИ при температуре $T2$, $\bar{\lambda}_{EDFS T1}$ — СЦДВ спектра выходного излучения ЭСИ при температуре $T1$.

Разница между значениями коэффициентов k_{λ} и k_{EDFS} находится в диапазоне от 0,107 до 0,215 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Отметим, что величина k_{λ} была получена для случая, когда ВОГ не подвергался воздействию температуры, то есть параметр k_{tFOG} был постоянным. Зачастую из-за особенностей конструкции оптической схемы ВОГ измерение спектров для получения k_{λ} затруднено, и в таком случае возможно определить только k_{EDFS} .

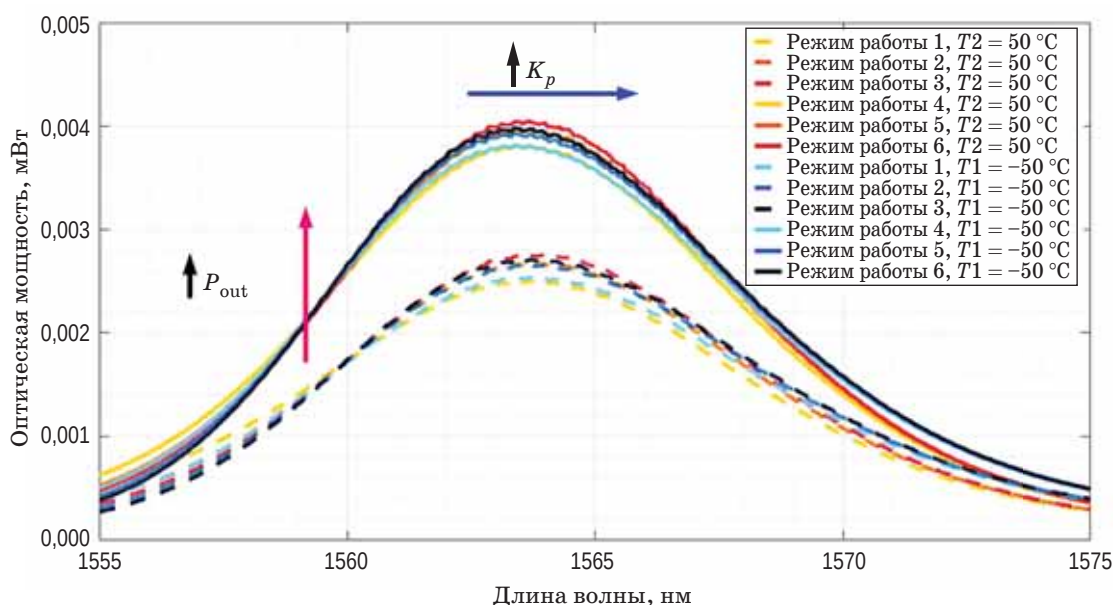


Рис. 3. Спектры выходного излучения ЭСИ
Fig. 3. EDFS optical emission spectra

Таблица 4. Параметры спектров излучения ЭСИ при различных режимах работы, $T_1 = -50\text{ °C}$, $T_2 = 50\text{ °C}$
Table 4. Parameters of the EDFS optical emission spectra under various operating modes, $T_1 = -50\text{ °C}$, $T_2 = 50\text{ °C}$

РР	1	2	3	4	5	6
P_{out} , мВт		5			7	
K_p , ед.	0,45	0,6	0,75	0,45	0,6	0,75
Характеристики спектров ЭСИ						
$\bar{\lambda}_{EDFS\ T1}$, нм	1563,940	1564,673	1564,980	1564,068	1564,497	1564,683
$\bar{\lambda}_{EDFS\ T2}$, нм	1565,774	1566,249	1566,432	1565,507	1565,771	1565,885
k_{EDFS} , млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$	-11,727	-10,072	-9,278	-9,200	-8,143	-7,682
Характеристики спектров ЭСИ на выходе ВОГ ВОГ						
$\bar{\lambda}_{T1}$, нм	1563,599	1564,340	1564,647	1563,857	1564,280	1564,464
$\bar{\lambda}_{T2}$, нм	1565,399	1565,895	1566,069	1565,268	1565,537	1565,637
k_{λ} , млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$	-11,512	-9,940	-9,088	-9,023	-8,036	-7,498

Примечание: погрешность $\bar{\lambda}$: $\pm\sigma = 0,003\text{ нм}$; погрешность k_{EDFS} и k_{λ} : $\pm\sigma = 0,027\text{ млн }^{-1}/^{\circ}\text{C}$; РР — режим работы ЭСИ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Согласно приведённой ранее методике определения КТЗ МК ВОГ, на втором этапе исследования кронштейн с ВОГ и ЭСИ размещался на планшайбе (столе) одноосевого стенда iXBlue EVO-10-HD-TC в термокамере (рис. 4).

Регистрация сигнала угловой скорости ВОГ проводилась при температурах плюс 50 °C и минус 50 °C . После установления теплового равновесия в термокамере и стабилизации показаний датчиков температуры ВОГ стол вращался согласно предварительно заданной программе со скоростями $\pm 40\text{ °/с}$ и $\pm 500\text{ °/с}$ как показано на диаграмме (рис. 5). Время

вращения на каждой скорости составляло 90 с, пауза между вращениями — 45 с, из которых 15 с выделялось на возвращение стола в начальное положение (0° или 360°). Программа вращения повторялась для всех режимов ра-



Рис. 4. Расположение ВОГ на одноосевом стенде в термокамере

Fig. 4. The placement of FOG on a single-axis stand in a thermal chamber

боты ЭСИ. По значениям регистрируемой ВОГ угловой скорости вращения была определена величина МК ВОГ μ и коэффициента его температурной зависимости k_μ (табл. 5).

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТУРА

Далее, используя значения КТЗ МК ВОГ и КТЗ СЦДВ спектра излучения ЭСИ, по формуле (12) рассчитан КТЧ исследуемого ВОК ВОГ (табл. 6).

Значение суммы k_μ и k_λ при изменении последнего остаётся в пределах от $6,250 \pm 0,028$ до $7,567 \pm 0,028$ млн $^{-1}/^\circ\text{C}$, а среднее значение КТЧ исследуемого ВОК ВОГ составило $6,863 \pm 0,028$ млн $^{-1}/^\circ\text{C}$ с отклонением $\sigma = 0,45$ млн $^{-1}/^\circ\text{C}$, учитывая все режимы работы ЭСИ и оба метода подстройки U_π . Полученная величина k_S близка по значению к теоретическим оценкам и экспериментальным данным, полученным на приборах подобной конструкции другими методами (табл. 2).

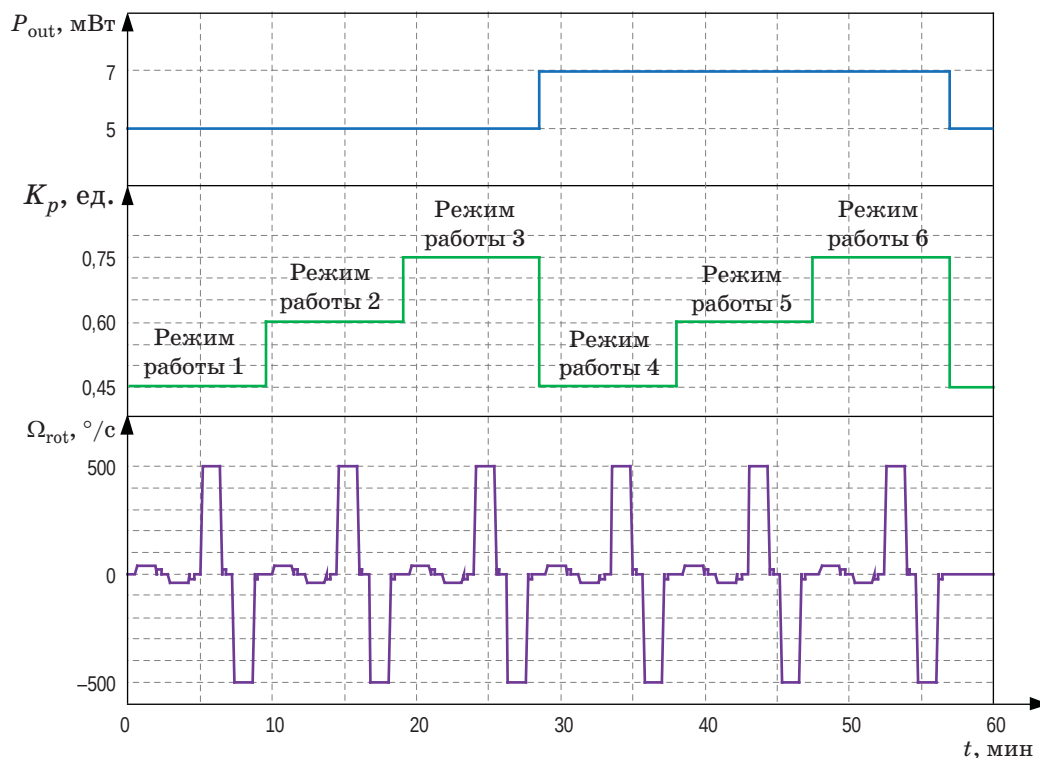


Рис. 5. Временная диаграмма изменения выходной мощности, коэффициента накачки ЭСИ и скорости вращения поворотного стола при постоянной температуре в камере

Fig. 5. Diagram of the output power, pump coefficient of the EDFS changes, and rotation speed of the turntable variation at a constant temperature in the thermal chamber

Таблица 5. Масштабный коэффициент ВОГ μ и коэффициент его температурной зависимости k_μ при нескольких режимах работы ЭСИ, $T_1 = -50^\circ\text{C}$, $T_2 = 50^\circ\text{C}$

Table 5. The scale factor of FOG μ and its temperature coefficient k_μ under several EDFS operating modes, $T_1 = -50^\circ\text{C}$, $T_2 = 50^\circ\text{C}$

Подстройка U_π	PP	μ_{T2} , ед.	μ_{T1} , ед.	k_μ , млн $^{-1}/^\circ\text{C}$
По температуре	1	1,0001092 $\pm$ 0,0000003	0,9982048 $\pm$ 0,0000005	19,079 $\pm$ 0,005
	2	0,9996315 $\pm$ 0,0000003	0,9979731 $\pm$ 0,0000004	16,618 $\pm$ 0,004
	3	0,9994323 $\pm$ 0,0000003	0,9978826 $\pm$ 0,0000004	15,530 $\pm$ 0,004
	4	0,9999937 $\pm$ 0,0000002	0,9983536 $\pm$ 0,0000004	16,428 $\pm$ 0,004
	5	0,9997203 $\pm$ 0,0000002	0,9982292 $\pm$ 0,0000004	14,937 $\pm$ 0,004
	6	0,9996011 $\pm$ 0,0000003	0,9981839 $\pm$ 0,0000004	14,198 $\pm$ 0,005
Автоматическая	1	1,0001095 $\pm$ 0,0000003	0,9982123 $\pm$ 0,0000004	19,006 $\pm$ 0,005
	2	0,9996313 $\pm$ 0,0000003	0,9979815 $\pm$ 0,0000007	16,531 $\pm$ 0,007
	3	0,9994319 $\pm$ 0,0000003	0,9979013 $\pm$ 0,0000004	15,338 $\pm$ 0,005
	4	0,9999934 $\pm$ 0,0000003	0,9983778 $\pm$ 0,0000004	16,182 $\pm$ 0,005
	5	0,9997200 $\pm$ 0,0000003	0,9982517 $\pm$ 0,0000009	14,712 $\pm$ 0,009
	6	0,9996007 $\pm$ 0,0000002	0,9982043 $\pm$ 0,0000008	13,995 $\pm$ 0,009

Примечание: погрешность оценивалась по СКО (σ); PP — режим работы ЭСИ.

Таблица 6. Коэффициенты температурной зависимости МК ВОГ, ЭСИ и коэффициент температурной чувствительности ВОК ВОГ

Table 6. Temperature coefficients of FOG scale factor, EDFS and FOG fiber–optic loop thermal sensitivity coefficient

Подстройка U_π	PP	k_μ , млн $^{-1}/^\circ\text{C}$	k_λ , млн $^{-1}/^\circ\text{C}$	k_S , млн $^{-1}/^\circ\text{C}$
По температуре	1	19,079 $\pm$ 0,005	–11,512 $\pm$ 0,027	7,567 $\pm$ 0,028
	2	16,618 $\pm$ 0,004	–9,940 $\pm$ 0,027	6,678 $\pm$ 0,028
	3	15,530 $\pm$ 0,004	–9,088 $\pm$ 0,027	6,442 $\pm$ 0,028
	4	16,428 $\pm$ 0,004	–9,023 $\pm$ 0,027	7,405 $\pm$ 0,028
	5	14,937 $\pm$ 0,004	–8,036 $\pm$ 0,027	6,901 $\pm$ 0,028
	6	14,198 $\pm$ 0,005	–7,498 $\pm$ 0,027	6,700 $\pm$ 0,028
Автоматическая	1	19,006 $\pm$ 0,005	–11,512 $\pm$ 0,027	7,494 $\pm$ 0,028
	2	16,531 $\pm$ 0,007	–9,940 $\pm$ 0,027	6,591 $\pm$ 0,028
	3	15,338 $\pm$ 0,005	–9,088 $\pm$ 0,027	6,250 $\pm$ 0,028
	4	16,182 $\pm$ 0,005	–9,023 $\pm$ 0,027	7,159 $\pm$ 0,028
	5	14,712 $\pm$ 0,009	–8,036 $\pm$ 0,027	6,676 $\pm$ 0,029
	6	13,995 $\pm$ 0,009	–7,498 $\pm$ 0,027	6,497 $\pm$ 0,028

Примечание: погрешность оценивалась по СКО (σ); PP — режим работы ЭСИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленная взаимозависимость масштабного коэффициента ВОГ, средневзвешенной по частоте центральной длины волны спектра источника излучения и коэффициента температурной чувствительности ВОК ВОГ позволила

на основе экспериментально полученных данных о масштабном коэффициенте ВОГ и средневзвешенной по частоте центральной длине волны спектра источника излучения для диапазона температур от минус 50°C до плюс 50°C определить коэффициент температурной чув-

ствительности k_S ВОК ВОГ, среднее значение которого составило $6,863 \pm 0,028$ млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$ с отклонением $\sigma = 0,45$ млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Обзор статей показал, что другие методы для аналогичных моделей ВОГ дают значения k_S в диапазоне от 2 до 10 млн $^{-1}/^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о достоверности предложенного метода.

Метод позволяет при известных температурных и спектральных характеристиках источника излучения обойтись без дорогостоящего измерительного оборудования и произвести измерение k_S , а также настроить режим работы источника излучения для достижения минимального значения коэффициента температурной зависимости МК ВОГ.

Кроме того, метод применим при разработке конструкции ВОК, обработке процесса намотки и состава пропитки (компаунда) ВОК для оценки полученного k_S и проведения последующих корректировок по его минимизации или согласования его с k_λ для получения минимального значения. В отличие от других методов, предложенный метод хорошо сочетается с типовыми режимами эксплуатации ВОГ, так как учитывает особенности работы всех элементов и их спектральные зависимости, что приводит к наиболее точному результату.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nayak J. Fiber-optic gyroscopes: From design to production // *Applied Optics*. 2011. V. 50. № 25. P. 152–161. <https://doi.org/10.1364/AO.50.00E152>
2. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective // *Gyroscopy and Navigation*. 2012. V. 3. P. 223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>
3. Chamoun J.N., Dignonnet M.J.F. Noise and bias error due to polarization coupling in a fiber optic gyroscope // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. № 13. P. 2839–2847. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2416155>
4. Sanders G.A., Strandjord L.K., Wu J. et al. Development of compact resonator fiber optic gyroscopes // 4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kauai, Hawaii, USA. March 27–30. 2017. P. 168–170. <https://doi.org/10.1109/ISISS.2017.7935657>
5. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А. Современное состояние разработок волоконно-оптических гироскопов и перспективы их развития // *Гироскопия и навигация*. 2023. Т. 31. № 4. С. 2–21. <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168323>
6. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope. Norwood, USA: Artech House, 2022. 550 p.
7. Huang Y.-W., Peng T.-S., Wang L.A. et al. Performance comparison of fiber-optic gyroscopes using single pass backward and double pass backward superfluorescent fiber sources // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, United Kingdom. October 5–9. 2009. V. 7503. P. 651–654. <https://doi.org/10.1117/12.835365>

СПИСОК АББРЕВИАТУР

- АЦП — аналого-цифровой преобразователь
 ВОГ — волоконно-оптический гироскоп
 ВОК — волоконно-оптический контур
 ВОТ — волоконно-оптический тракт
 КТЗ — коэффициент температурной зависимости
 КТХ — камера тепла-холода
 КТЧ — коэффициент температурной чувствительности
 МИОС — многофункциональная интегральная оптическая схема
 МК — масштабный коэффициент
 ПК — персональный компьютер
 СЦДВ — средневзвешенная по частоте центральная длина волны
 ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь
 ЭСИ — эрбиевый суперлюминесцентный источник
 ADC — analog-to-digital converter
 FOG — fiber-optic gyroscope
 FOL — fiber-optic loop
 FOP — fiber-optic path
 TC — temperature coefficient
 HCTC — hot & cold test chamber
 TSC — thermal sensitivity coefficient
 MIOC — multifunctional integrated optical chip
 SF — scale factor
 FWMCW — frequency-weighted central wavelength
 PC — personal computer
 DAC — digital-to-analog converter
 EDFS — erbium-doped fiber source

REFERENCES

1. Nayak J. Fiber-optic gyroscopes: From design to production // *Applied Optics*. 2011. V. 50. № 25. P. 152–161. <https://doi.org/10.1364/AO.50.00E152>
2. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective // *Gyroscopy and Navigation*. 2012. V. 3. P. 223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>
3. Chamoun J.N., Dignonnet M.J.F. Noise and bias error due to polarization coupling in a fiber optic gyroscope // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. № 13. P. 2839–2847. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2416155>
4. Sanders G.A., Strandjord L.K., Wu J. et al. Development of compact resonator fiber optic gyroscopes // 4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kauai, Hawaii, USA. March 27–30. 2017. P. 168–170. <https://doi.org/10.1109/ISISS.2017.7935657>
5. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A. Current state of development of fiber-optic gyroscopes and prospects for their advancement [in Russian] // *Gyroscopy and Navigation*. 2023. V. 31. № 4. P. 2–21. <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168323>
6. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope. Norwood, USA: Artech House, 2022. 550 p.
7. Huang Y.-W., Peng T.-S., Wang L.A. et al. Performance comparison of fiber-optic gyroscopes using single pass backward and double pass backward superfluorescent fiber sources // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, United Kingdom. October 5–9. 2009. V. 7503. P. 651–654. <https://doi.org/10.1117/12.835365>

8. Guillaumond D., Meunier J.-P. Comparison of two flattening techniques on a double-pass erbium-doped superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2001. V. 7. № 1. P. 17–21. <https://doi.org/10.1109/2944.924004>
9. Wan H., Zhang D., Sun X. Stabilization of a superfluorescent fiber source with high performance erbium doped fibers // *Optical Fiber Technology*. 2013. V. 19. № 3. P. 264–268. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.02.006>
10. Chang J., Manning T. Experimental optimization of an erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes // *Journal of Semiconductors*. 2011. V. 32. № 10. P. 104007. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/10/104007>
11. Patrick H.J., Kersey A.D., Bums W.K. et al. An erbium-doped superfluorescent fiber source with long period fiber grating wavelength stabilization // *12th International Conference on Optical Fiber Sensors*. Williamsburg, USA. 1997. V. 16. P. 138–141. <https://doi.org/10.1364/OFS.1997.OWB6>
12. Li Y., Jiang M., Zhang C.X. et al. High stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating an Er-doped fiber filter and a faraday rotator mirror // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013. V. 25. № 8. P. 731–733. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2250948>
13. Wang A., Ou P., Feng L.S. et al. High-stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating photonic bandgap fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2009. V. 21. № 24. P. 1843–1845. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2034621>
14. Wilkinson M., Bebbington A., Cassidy S.A. et al. D-fibre filter for erbium gain spectrum flattening // *Electronics Letters*. 1992. V. 2. № 28. P. 131–132. <https://doi.org/10.1049/el:19920081>
15. Wang A. High stability Er-doped superfluorescent fiber source improved by incorporating bandpass filter // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2011. V. 23. № 4. P. 227–229. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2098436>
16. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Т. 2 / Перевод с англ. В.Л. Дербова. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 784 с.
17. Moeller R.P., Burns W.K., Frigo N.J. Open-loop output and scale factor stability in a fiber-optic gyroscope // *Journal of Lightwave Technology*. 1989. V. 7. № 2. P. 262–269. <https://doi.org/10.1109/50.17765>
18. Chen S., Cheng J., Gao W. A phase modulation method for improving the scale factor stability of fiber-optic gyroscope // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan. August 05–08. 2008. P. 37–42. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798722>
19. Shen C., Chen X. Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature // *Applied Optics*. 2012. V. 51. № 14. P. 2541–2547. <https://doi.org/10.1364/AO.51.002541>
20. Zhang E., Yang L., Xue B. et al. Compensation for the temperature dependency of fiber optic gyroscope scale factor via Er-doped superfluorescent fiber source // *Optical Engineering*. 2018. V. 57. № 8. P. 085106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.8.085106>
21. Zhao S., Zhou Y., Shu X. Study on nonlinear error calibration of fiber optical gyroscope scale factor based on LSTM // *Journal of the International Measurement Confederation*. 2022. V. 190. P. 110783. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110783>
8. Guillaumond D., Meunier J.-P. Comparison of two flattening techniques on a double-pass erbium-doped superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2001. V. 7. № 1. P. 17–21. <https://doi.org/10.1109/2944.924004>
9. Wan H., Zhang D., Sun X. Stabilization of a superfluorescent fiber source with high performance erbium doped fibers // *Optical Fiber Technology*. 2013. V. 19. № 3. P. 264–268. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.02.006>
10. Chang J., Manning T. Experimental optimization of an erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes // *Journal of Semiconductors*. 2011. V. 32. № 10. P. 104007. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/10/104007>
11. Patrick H.J., Kersey A.D., Bums W.K. et al. An erbium-doped superfluorescent fiber source with long period fiber grating wavelength stabilization // *12th International Conference on Optical Fiber Sensors*. Williamsburg, USA. 1997. V. 16. P. 138–141. <https://doi.org/10.1364/OFS.1997.OWB6>
12. Li Y., Jiang M., Zhang C.X. et al. High stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating an Er-doped fiber filter and a faraday rotator mirror // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013. V. 25. № 8. P. 731–733. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2250948>
13. Wang A., Ou P., Feng L.S. et al. High-stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating photonic bandgap fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2009. V. 21. № 24. P. 1843–1845. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2034621>
14. Wilkinson M., Bebbington A., Cassidy S.A. et al. D-fibre filter for erbium gain spectrum flattening // *Electronics Letters*. 1992. V. 2. № 28. P. 131–132. <https://doi.org/10.1049/el:19920081>
15. Wang A. High stability Er-doped superfluorescent fiber source improved by incorporating bandpass filter // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2011. V. 23. № 4. P. 227–229. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2098436>
16. Saleh B., Teich M.C. *Fundamentals of Photonics*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2007. 1201 p.
17. Moeller R.P., Burns W.K., Frigo N.J. Open-loop output and scale factor stability in a fiber-optic gyroscope // *Journal of Lightwave Technology*. 1989. V. 7. № 2. P. 262–269. <https://doi.org/10.1109/50.17765>
18. Chen S., Cheng J., Gao W. A phase modulation method for improving the scale factor stability of fiber-optic gyroscope // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan. August 05–08. 2008. P. 37–42. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798722>
19. Shen C., Chen X. Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature // *Applied Optics*. 2012. V. 51. № 14. P. 2541–2547. <https://doi.org/10.1364/AO.51.002541>
20. Zhang E., Yang L., Xue B. et al. Compensation for the temperature dependency of fiber optic gyroscope scale factor via Er-doped superfluorescent fiber source // *Optical Engineering*. 2018. V. 57. № 8. P. 085106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.8.085106>
21. Zhao S., Zhou Y., Shu X. Study on nonlinear error calibration of fiber optical gyroscope scale factor based on LSTM // *Journal of the International Measurement Confederation*. 2022. V. 190. P. 110783. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110783>

22. Кикилич Н.Е. Стабилизация параметров оптического излучения суперлюминесцентного волоконного источника для применения в волоконно-оптическом гироскопе // Автореферат канд. дис. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. 138 с.
23. Дейнека И.Г. Исследование и оптимизация точностных и динамических параметров волоконно-оптических интерферометрических датчиков // Автореферат канд. дис. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2014. 124 с.
24. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A. et al. Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal // *Gyroscopy and Navigation*. 2013. V. 4. № 2. P. 92–98. <https://doi.org/10.1134/S2075108713020041>
25. Boiron H. Rayleigh-OFDR strain distribution measurement of a self-standing fiber-gyroscope coil // 9th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Avignon. France. May 08–11. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL53425.2022.9787740>
26. Kikilich N., Aleinik A., Pogudin G. et al. Stabilization of the mean wavelength of an erbium-doped fiber source as part of high-accuracy FOG with increased spectrum width // *Applied Optics*. 2022. V. 61. № 23. P. 6827–6833. <https://doi.org/10.1364/AO.460504>
22. Kikilich N.E. Stabilization of parameters of optical emission of a superluminescent fiber source for application in fiber-optic gyroscope [in Russian] // PhD (Optics) thesis. Saint Petersburg: ITMO University, 2018. 138 p.
23. Deineka I.G. Study and optimization of accuracy and dynamic parameters of fiber-optic interferometric sensors [in Russian] // PhD (Instruments and methods of measurement) thesis. Saint Petersburg: ITMO University, 2014. 124 p.
24. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A. et al. Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal // *Gyroscopy and Navigation*. 2013. V. 4. № 2. P. 92–98. <https://doi.org/10.1134/S2075108713020041>
25. Boiron H. Rayleigh-OFDR strain distribution measurement of a self-standing fiber-gyroscope coil // 9th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Avignon. France. May 08–11. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL53425.2022.9787740>
26. Kikilich N., Aleinik A., Pogudin G. et al. Stabilization of the mean wavelength of an erbium-doped fiber source as part of high-accuracy FOG with increased spectrum width // *Applied Optics*. 2022. V. 61. № 23. P. 6827–6833. <https://doi.org/10.1364/AO.460504>

АВТОРЫ

Григорий Константинович Погудин — инженер НИЦ световодной фотоники, аспирант, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57838480100; <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>; gkpogudin@itmo.ru

Артём Сергеевич Алейник — канд. техн. наук, технический директор НИЦ световодной фотоники, доцент института «Высшая инженерно-техническая школа», зав. лабораторией программируемой электроники, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 54793978900; <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>; artemal@itmo.ru

Александр Николаевич Никитенко — канд. техн. наук, ведущий инженер НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57196353862; <https://orcid.org/0000-0002-2441-473X>; anikitenko@itmo.ru

Илья Романович Арцер — инженер НИЦ световодной фотоники, мл. науч. сотр. научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики, аспирант, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57212562168; <https://orcid.org/0000-0003-4018-162X>; irartser@itmo.ru

Владимир Евгеньевич Стригалёв — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. НИЦ световодной фотоники, профессор института «Высшая инженерно-техническая школа», Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6603225596; <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>; vstrglv@mail.ru

Вадим Сергеевич Ошлаков — аспирант, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57442309800; <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>; vsoshlakov@itmo.ru

Сергей Александрович Волковский — канд. техн. наук, научный сотрудник НИЦ световодной фотоники, ассистент института «Высшая инженерно-техническая школа», Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57195476252; <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>; savolkovskii@itmo.ru

AUTHORS

Grigori K. Pogudin — Engineer at the NRC Light-Guided Photonics, PhD Student, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57838480100; <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>; gkpogudin@itmo.ru

Artem S. Aleinik — PhD, Technical Director at the NRC Light-Guided Photonics, Associate Professor of the Higher School of Engineering and Technology, Head of the Programmable Electronics Laboratory, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 54793978900; <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>; artemal@itmo.ru

Alexander N. Nikitenko — PhD, Lead Engineer at the NRC Light-Guided Photonics, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57196353862; <https://orcid.org/0000-0002-2441-473X>; anikitenko@itmo.ru

Ilya R. Artser — Engineer at NRC the Light-Guided Photonics, Junior Researcher at Research and Educational Center for Photonics and Optoinformatics, PhD Student, 196191, ITMO University, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57212562168; <https://orcid.org/0000-0003-4018-162X>; irartser@itmo.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD, Senior Researcher at the NRC Light-Guided Photonics, Professor at the Higher School of Engineering and Technology, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 6603225596; <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>; vstrglv@mail.ru

Vadim S. Oshlakov — PhD Student, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57442309800; <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>; vsoshlakov@itmo.ru

Sergei A. Volkovskii — PhD, Researcher at the NRC Light-Guided Photonics, Assistant at the Higher School of Engineering and Technology, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57195476252; <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>; savolkovskii@itmo.ru

Даниил Сергеевич Смирнов — канд. техн. наук, руководитель группы научно-технического развития НИЦ световодной фотоники, ассистент института «Высшая инженерно-техническая школа», Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57204933153; <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>; dsmirnov@itmo.ru

Ида Леонидовна Кубланова — инженер НИЦ световодной фотоники, аспирант, Университет ИТМО, 196191, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57205020683; <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>; cubeida@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2024
Одобрена после рецензирования 17.05.2024
Принята к печати 28.06.2024

Daniil S. Smirnov — PhD, Head of the Scientific and Technological Development Group at the NRC Light-Guided Photonics, Assistant at the Higher School of Engineering and Technology, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID 57204933153; <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>; dsmirnov@itmo.ru

Ida L. Kublanova — Engineer at the NRC Light-Guided Photonics, PhD Student, ITMO University, 196191, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57205020683; <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>; cubeida@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 19.04.2024
Approved after review 17.05.2024
Accepted for publication 28.06.2024