

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 531.383:621.375.8
EDN WUICMV

А. С. АЛЕЙНИК, С. А. ВОЛКОВСКИЙ, В. С. ОШЛАКОВ, А. Б. МУХТУБАЕВ,
В. Е. СТРИГАЛЕВ

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП НАВИГАЦИОННОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ С ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Постоянство масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) напрямую зависит от стабильности центральной длины волны источника оптического излучения. Широкополосные высокостабильные источники высокоточных ВОГ хоть и обеспечивают необходимую стабильность центральной длины волны, отличаются довольно большими габаритами, что усложняет миниатюризацию ВОГ и систем на их основе. В настоящей работе рассмотрено применение полупроводникового лазерного диода с частотно-импульсной токовой модуляцией в составе ВОГ навигационного класса точности. Показано, что в этом случае обеспечивается высокая стабильность центральной длины волны излучения лазерного диода (не хуже 1,6 ppm), а уровень шума и дрейф нуля ВОГ достигают $0,002 \text{ } ^\circ/\text{ч}^{1/2}$ и $0,009 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ соответственно. Сопоставимые результаты можно получить при использовании в ВОГ широкополосных высокостабильных источников.

Ключевые слова: источники оптического излучения, спектральные характеристики, волоконно-оптический гироскоп, стабильность масштабного коэффициента.

Алейник Артем Сергеевич. Кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО (С.-Петербург).

Волковский Сергей Александрович. Научный сотрудник НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

Ошлаков Вадим Сергеевич. Начальник группы НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

Мухтубаев Азамат Булатович. Кандидат технических наук, заведующий лабораторией НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

Стригалева Владимир Евгеньевич. Кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

1. Введение, общие положения

Принцип действия ВОГ [1] основан на эффекте Саньяка, возникающем в кольцевом волоконно-оптическом интерферометре. Эффект проявляется в виде фазового сдвига между оптическими волнами, которые распространяются по интерферометру в противоположных направлениях. Возникающий фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ (разность фаз Саньяка) пропорционален скорости вращения интерферометра вокруг своей оси Ω и определяется соотношением

$$\Delta\varphi = M\Omega, \quad (1)$$

где M – масштабный коэффициент (коэффициент преобразования) ВОГ, определяемый выражением

$$M = \frac{4\pi R L}{\lambda c}, \quad (2)$$

где λ – длина волны источника излучения, м; c – скорость света в вакууме, м/с; R – радиус контура кольцевого интерферометра, м; L – длина оптического волокна в контуре.

Масштабный коэффициент ВОГ, как видно из (2), обратно пропорционален длине волны источника излучения λ , которая для симметричных спектров гауссовской формы в частотной области практически совпадает с длиной волны, где спектральная плотность мощности излучения максимальна. При использовании широкополосного источника оптического излучения необходимо уточнить параметр λ [2]. Реальные источники могут иметь несимметричные спектры негауссовской формы, и в общем случае следует задействовать средневзвешенную длину волны (СДВ – λ_{mw}), определяемую как

$$\lambda_{mw} = \frac{c}{\nu_{mw}} = c \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i \cdot P_i \cdot (\nu_i - \nu_{i-1})}{\sum_{i=1}^n P_i (\nu_i - \nu_{i-1})} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где ν_{mw} – средневзвешенная частота (Гц), которая задается выражением в скобках; P_i – мощность оптического излучения (Вт); ν – частота оптического излучения (Гц); c – скорость света в вакууме, м/с; n – общее количество шагов дискретизации по частоте спектра оптического излучения, соответствующее разрешающей способности оптического спектроанализатора. Смещения и флуктуации СДВ возникают в результате температурных и механических воздействий на источник, а также вследствие его старения.

Для ВОГ навигационного класса точности требуется стабильность СДВ на уровне 1 ppm с учетом влияния всех внешних воздействующих факторов, среди которых температура полупроводниковой структуры, ток накачки и др. [3]. Наиболее часто в состав таких гироскопов входят эрбиевые суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения (ЭСВИОИ). Их широкий спектр и, как следствие, малая длина когерентности излучения позволяют эффективно подавлять паразитные интерференционные сигналы, вызванные обратными отражениями и обратным рассеянием [3–5] в волоконно-оптическом контуре. Из недостатков ЭСВИОИ стоит выделить высокий относительный амплитудный шум (Relative Intensity Noise – RIN), напрямую повышающий уровень случайного блуждания угла (СБУ) ВОГ. Кроме того, применение активного легированного оптического волокна в конструкции ЭСВИОИ накладывает ограничения на минимизацию габаритов таких устройств. Для поддержания стабильности СДВ ЭСВИОИ, а также для компенсации влияния амплитудного

шума используются различные аппаратные и алгоритмические решения, что дополнительно увеличивает размеры источников и их энергопотребление [6–9].

Полупроводниковые лазерные диоды, в частности лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры), напротив, компактны, обладают низким RIN (ниже -157 дБ/Гц) [10] и более устойчивой СДВ при длительной работе, однако высокая временная когерентность их излучения приводит к тому, что в выходном сигнале ВОГ доминируют шумы, вызванные паразитной интерференцией [11].

Одно из возможных решений этой проблемы – уменьшение длины когерентности излучения с помощью фазовой модуляции широкополосным шумоподобным сигналом [12–15], что позволяет получить ВОГ с СБУ и дрейфом нуля, соответствующими критериям навигационного класса, а также со стабильностью СДВ 1 ppm и лучше. Недостатками описанного метода являются существенное усложнение оптической и электронной части (сопровождающееся снижением надежности и ростом стоимости) и необходимость тонкой настройки глубины фазовой модуляции для подавления оптической несущей и преобразования спектра, что влечет за собой повышение требований к частотной полосе модулятора и мощности модулирующего сигнала.

В [16] рассматривается применение в качестве источника излучения в ВОГ с открытым контуром РОС-лазера, благодаря частотно-импульсной токовой модуляции которого удалось уменьшить длину когерентности излучения на два порядка – с более чем 100 до 2,5 мм. При этом СБУ составило $0,002$ °/ч^{1/2}, стабильность СДВ – 1,3 ppm, дрейф нуля – $0,047$ °/ч, что удовлетворяет критериям ВОГ тактического класса точности.

Современные ВОГ навигационного класса точности построены на основе схемы с замкнутым контуром, которая в сочетании с долговременной стабильностью и низким RIN лазерного источника может послужить альтернативным путем развития высокоточных ВОГ. Его применение требует значительного снижения длины временной когерентности в интерферометрической схеме ВОГ.

В настоящей работе исследованы основные точностные характеристики ВОГ с замкнутым контуром, в качестве источника излучения использован полупроводниковый лазерный диод с частотно-импульсной токовой модуляцией для повышения стабильности масштабного коэффициента гироскопа. Выполнена сравнительная оценка предложенной конфигурации ВОГ с лазерным источником с конфигурацией на основе ЭСВИОИ, полученные характеристики сопоставлены с требованиями к ВОГ навигационного класса точности.

2. Частотно-импульсная токовая модуляция РОС-лазера

Как известно, прямая токовая модуляция РОС-лазера может приводить к появлению частотной модуляции, что, в свою очередь, вызывает расширение огибающей спектра излучения. Прямая частотно-импульсная токовая модуляция РОС-лазера [17–18] основана на применении импульсного тока накачки высокой мощности, в результате чего температурный сдвиг центральной длины волны лазера при кратковременном разогреве активной области на кристалле может достигать 10 нм.

В исследовании был задействован полупроводниковый РОС-лазер с номинальной центральной длиной волны 1541,75 нм, максимальной выходной оптической мощностью 20 мВт, RIN величиной -145 дБ/Гц, шириной спектральной линии менее 2 МГц и встроенным элементом Пельтье для термостабилизации.

На лазерный диод подавались токовые прямоугольные импульсы частотой 130 кГц (соответствует удвоенной собственной частоте волоконно-оптического контура) и длительностью 1 мкс. Несмотря на то что величина тока в импульсах была на несколько порядков больше рабочего тока РОС-лазера (40 мА) и составляла 1 А, в силу кратковременности такого воздействия тепловой диод не повреждается, а расширение спектра за счет частотной модуляции было приблизительно 0,5 нм (рис. 1).

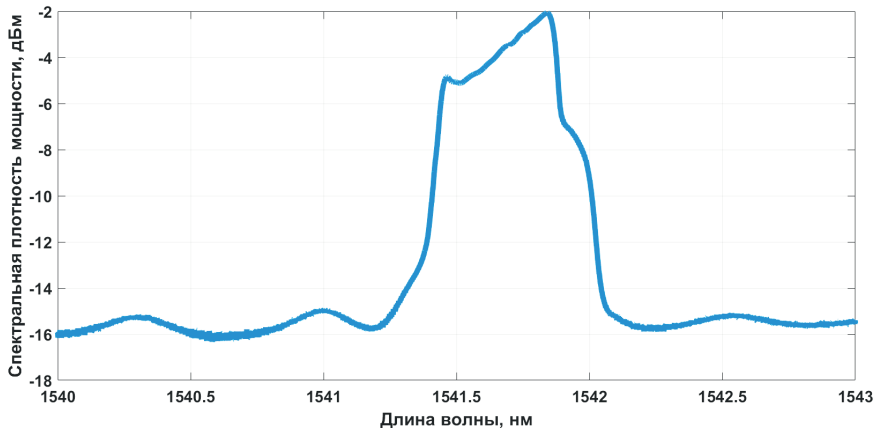


Рис. 1. Огибающая спектра излучения РОС-лазера с частотно-импульсной токовой модуляцией; разрешающая полоса спектроанализатора – 0,03 нм

Огибающая спектра излучения РОС-лазера с частотно-импульсной токовой модуляцией регистрировалась оптическим спектроанализатором Yokogawa AQ6370C.

3. Принцип работы ВОГ с замкнутым контуром с РОС-лазером в качестве источника оптического излучения

Функциональная схема ВОГ с замкнутым контуром с предложенным методом генерации оптического излучения, описанным в [14], представлена на рис. 2.

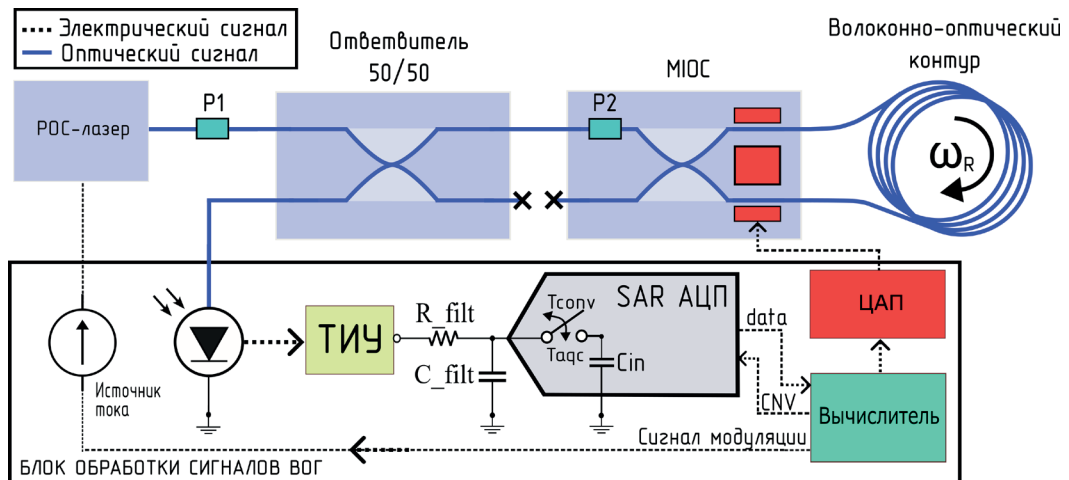


Рис. 2. Блок-схема ВОГ с РОС-лазером в качестве источника оптического излучения; P1 и P2 – поляризаторы; МИОС – многофункциональная интегрально-оптическая схема; ТИУ – трансимпедансный усилитель; SAR АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь

Импульс оптического излучения РОС-лазера проходит через поляризатор Р1 и поступает на вход Х-разветвителя с сохранением состояния поляризации оптического излучения, в котором делится на два плеча – измерительное и опорное. Через измерительное плечо излучение поступает на вход многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС на рис. 2), где разделяется по мощности на две равные части. Распространяющееся в волоконном контуре оптическое излучение в обоих направлениях за счет эффекта Саньяка приобретает разность фаз, пропорциональную скорости вращения. На выходе контура импульсы излучения интерферируют, результат интерференции детектируется фотоприемным трактом ВОГ.

Так как центральная длина волны РОС-лазера при частотно-импульсной токовой модуляции смещается в течение каждого импульса, выходной сигнал фотодетектора пропорционален общему фототоку, возникающему при облучении фотодиода потоком фотонов разных длин волн. Регистрируемый отклик интерферометра в такой схеме эквивалентен отклику, полученному при использовании источника излучения с меньшей, чем у РОС-лазера, эффективной длиной когерентности. Последняя зависит от кривой контраста, которая является результатом усреднения большого набора отдельных кривых контраста для различных длин волн излучения РОС-лазера в разные моменты времени [16].

Сигнал с фотоприемного тракта далее проходит через АЦП и попадает в блок цифровой обработки сигналов платы ВОГ, который вычисляет скорость вращения и вырабатывает компенсационный сигнал, преобразуемый ЦАП в управляющий сигнал для электрооптического фазового модулятора. Сигнал обеспечивает смещение рабочей точки интерферометра в точку квадратуры и компенсирует фазу Саньяка за счет пилообразной импульсной модуляции [1]. Частота модуляции лазера синхронизирована с частотой модуляции блока обработки сигналов и совпадает с удвоенной собственной частотой ВОГ (130 кГц).

4. Результаты измерений

Значения угловой скорости фиксировались при размещении ВОГ на неподвижном основании при комнатной температуре. На рис. 3 представлена выборка сигналов ВОГ в течение 2 с с частотой выдачи 50 Гц с прямой частотно-импульсной токовой модуляцией РОС-лазера и ВОГ с ЭСВИОИ ESS30 [19] с компенсацией избыточного шума.

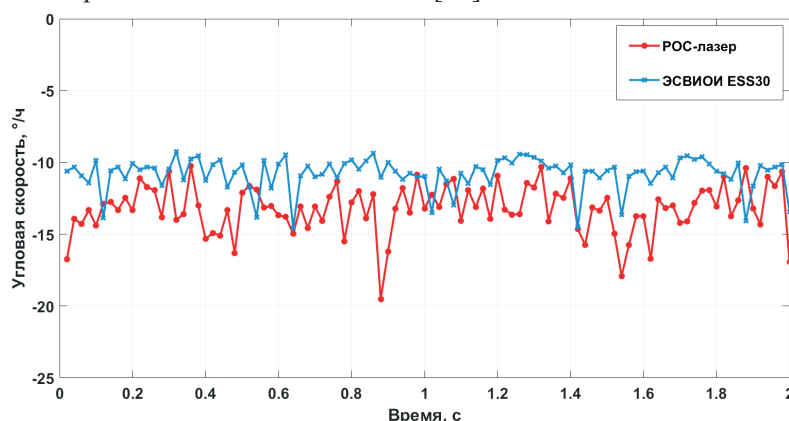


Рис. 3. Выборки сигналов ВОГ с ЭСВИОИ ESS30 и ВОГ с прямой частотно-импульсной токовой модуляцией РОС-лазера

Стандартные отклонения по каждой из двух выборок сопоставимы и составляют $1,2^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ для ВОГ с ESS30 и $1,9^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ для ВОГ на основе РОС-лазера. Эти показатели достигнуты благодаря предложенному методу и малой величине RIN РОС-лазера.

На рис. 4 представлены результаты вычисления вариации Аллана по выборкам выходных сигналов ВОГ длительностью 8 часов для конфигураций с ЭСВИОИ ESS30 и с прямой частотно-импульсной токовой модуляцией РОС-лазера. СБУ ВОГ по интервалу усреднения 1 с для обеих конфигураций близки $-0,002^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ и $0,001^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ соответственно, что удовлетворяет требованиям к ВОГ навигационного класса точности [1]. Стоит отметить, что отключение компенсации избыточного шума ВОГ с ЭСВИОИ приводит к повышению СБУ в 3-5 раз [19], кроме того, такая конфигурация проигрывает ВОГ с РОС-лазером по уровню СБУ и по габаритам.

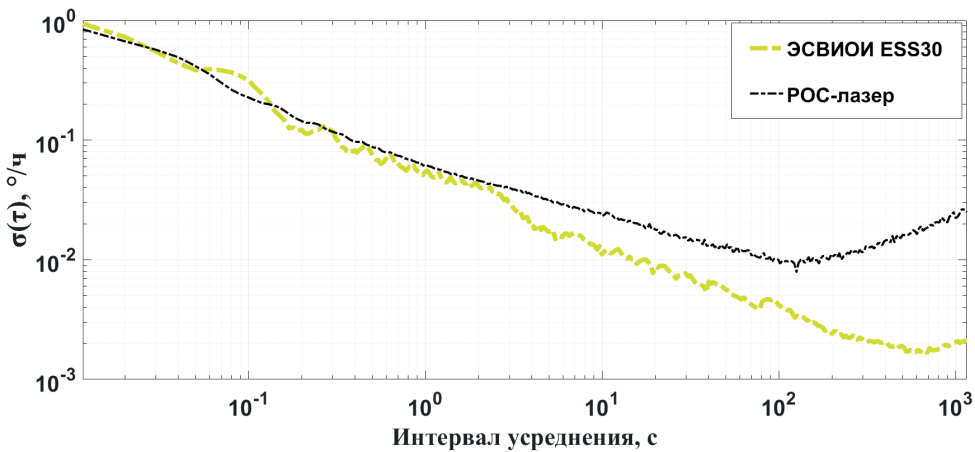


Рис. 4. Вариация Аллана $\sigma(\tau)$ для ВОГ с РОС-лазером и с SFS ESS30; τ – интервал усреднения

На рис. 5. показан дрейф СДВ РОС-лазера, термостабилизированного при помощи встроенного элемента Пельтье. Измерения были проведены при комнатной температуре с помощью спектроанализатора высокого разрешения.

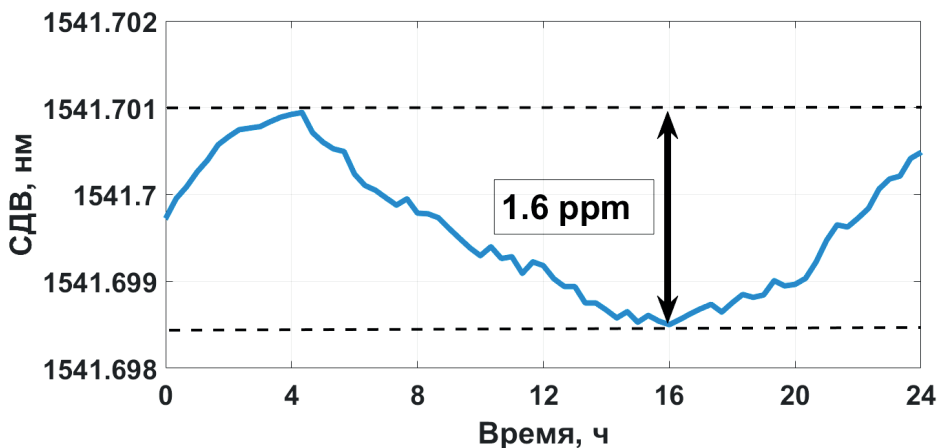


Рис. 5. Дрейф СДВ РОС-лазера с частотно-импульсной токовой модуляцией за 24 часа

Дрейф СДВ РОС-лазера при комнатной температуре не превышает 1,6 ppm, что соответствует критериям ВОГ навигационного класса точности. В таблице пред-

ставлены основные сравнительные характеристики ВОГ навигационного класса точности в конфигурациях на основе ESS30 в постоянном режиме с компенсацией избыточного шума и на основе РОС-лазера.

Т а б л и ц а

Сравнительные результаты измерений

Источник излучения	СБУ, $^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$	Дрейф нуля, $^{\circ}/\text{ч}$	СДВ, ppm
Критерии ВОГ навигационного класса точности	<0,005	<0,01	<5
РОС-лазер	0,002	0,009	1,6
ЭСВИОИ ESS30	0,001	0,005	>5

Невысокий уровень СБУ и дрейфа нуля при использовании РОС-лазера являются следствием двух причин. Во-первых, РОС-лазер изначально имеет низкий RIN, что непосредственно влияет на СБУ. Во-вторых, расширение огибающей спектра за счет быстрой перестройки центральной длины волны лазера с импульсной модуляцией позволяет уменьшить вклад в сигнал ВОГ ложных интерференционных сигналов, не связанных с угловой скоростью.

Заключение

В работе представлены точностные характеристики ВОГ навигационного класса точности с используемым в качестве источника излучения РОС-лазером с прямой частотно-импульсной токовой модуляцией. В рамках экспериментального исследования ВОГ на неподвижном основании при комнатной температуре получены значения угловой скорости за 8 часов с частотой регистрации 100 Гц с двумя источниками оптического излучения – РОС-лазера и ЭСВИОИ. Рассчитана вариация Аллана по полученной выборке. Величина СБУ гироскопа на основе РОС-лазера составляет $0,002^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$, дрейфа – $0,009^{\circ}/\text{ч}$ (при $\tau = 100$ с) при стабильности средневзвешенной длины волны 1,6 ppm, что удовлетворяет критериям ВОГ навигационного класса точности. Уровень долгосрочного дрейфа ВОГ при этом остается довольно высоким, для его снижения необходимы дополнительные исследования и поиск технических решений, которые позволят уменьшить длину когерентности оптического излучения РОС-лазера до длины когерентности ЭСВИОИ. Одним из возможных путей может быть применение массива РОС-лазеров, чтобы перекрыть более широкий спектральный диапазон при прямой частотно-импульсной токовой модуляции.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
No 25-12-20017, <https://rscf.ru/project/25-12-20017/>,
за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда*

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefèvre, H., *The Fiber-Optic Gyroscope*, Artech House, 2014.
2. Егоров Д.А., Ключникова Е.Л., Унтилов А.А., Алейник А.С., Волковский С.А., Кузнецов В.Н., Ошлаков В.С., Погудин Г.К., Лиюкумович Л.Б. Источники оптического излучения для волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2024. Т. 32. №. 2. С. 8–34. EDN DMBMAR.
3. Wysocki, P.F., Digonnet, M.J.F., Kim, B.Y., and Shaw, H.J., Characteristics of erbium-doped super-fluorescent fiber sources for interferometric sensor applications, *Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, no. 3, pp. 550–567.
4. Cutler, C. C., Newton, S.A., and Shaw, H. J., Limitation of rotation sensing by scattering, *Opt. Lett.*, 1981, vol. 5, pp. 488–490.
5. Bergh, R.A., Culshaw, B., Cutler, C.C., Lefevre, H.C., and Shaw, H.J., Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes, *Opt. Lett.*, 1982, vol. 7, no. 11, p. 563.
6. Aleinik, A., Deineka, I., Smolovik, M., Neforosnyi, S., and Rupasov, A., Compensation of excess RIN in fiber-optic gyro, *Gyroscopy and Navigation*, 2016, no. 7, pp. 214–222.
7. Guattari, F., Chouvin, S., Muluçon, C., and Lefèvre, H., A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope, *DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Karlsruhe, Germany, 2014, pp. 1–14, doi: 10.1109/InertialSensors.2014.7049411.
8. Zaleskaia, I. K. et al., Methods of Stabilization of Central Wavelength of Erbium-Doped Fiber Source for High-Accuracy Fiber Optic Gyroscope, *International Conference Laser Optics (ICLO)*, St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 1–1, doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285493.
9. Kikilich, N.E. et al., Stabilization of the mean wavelength of an erbium-doped fiber source as part of high-accuracy FOG with increased spectrum width, *Appl. Opt.*, 2022, 61, 6827–6833.
10. Zhao, Y.-G., et al., High-power and low-noise DFB semiconductor lasers for RF photonic links, *IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Digest CD*, Cocoa Beach, FL, USA, 2012, pp. 66–67, doi: 10.1109/AVFOP.2012.6344081.
11. Lloyd, S.W., Digonnet, M.J.F., and Fan, S., Modeling Coherent Backscattering Errors in Fiber Optic Gyroscopes for Sources of Arbitrary Line Width, *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 13, pp. 2070–2078.
12. Wheeler, J.M. and Digonnet, M.J.F., A Low-Drift Laser-Driven FOG Suitable for Trans-Pacific Inertial Navigation, *Journal of Lightwave Technology*, 2022, vol. 40, no. 22, pp. 7464–7470, doi: 10.1109/JLT.2022.3201189.
13. Chamoun, J. and Digonnet, M.J.F., Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation, *Opt. Lett.*, 2017, vol. 42, no. 8, pp. 1600–1603.
14. Wheeler, J.M. and Digonnet, M.J.F., A Low-Drift Laser-Driven FOG Suitable for Trans-Pacific Inertial Navigation, *Journal of Lightwave Technology*, 2022, vol. 40, no. 22, pp. 7464–7470, doi: 10.1109/JLT.2022.3201189.
15. Wheeler, J.M., Chamoun, J.N., and Digonnet, M.J.F., Optimizing Coherence Suppression in a Laser Broadened by Phase Modulation With Noise, *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 9, pp. 2994–3001, doi: 10.1109/JLT.2021.3061938.
16. Ошлаков В.С., Алейник А.С., Волковский С.А., Стригалева В.Е., Мухтубаев А.Б. Применение полупроводникового лазерного диода в качестве источника оптического излучения волоконно-оптического гироскопа // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 8. С. 21–31. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-08-21-31>.
17. Njegovec, M. and Donlagic, D., Rapid and broad wavelength sweeping of standard telecommunication distributed feedback laser diode, *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, no. 11, pp. 1999–2001.
18. Ошлаков В.С., Алейник А.С., Волковский С.А., Смирнов Д.С. Исследование характеристик полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью в режиме источника и приемника оптического излучения для регистрации отклика волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 699–708, doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-699-708.
19. Егоров Д.А., Ключникова Е.Л. Результаты сравнительных исследований источников оптического излучения для волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №4 (119). С.184–192. DOI: 10.17285/0869-7035.00111.

Aleinik, A.S., Volkovsky, S.A., Oshlakov, V.S., Mukhtubaev, A.B., Strigalev, V.E. (ITMO University, St. Petersburg)

Navigation-Grade Laser-Driven Fiber-Optic Gyroscope, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 3 (130), pp. 103–111.

Abstract. The scale factor stability of a fiber-optic gyroscope (FOG) directly depends on the stability of the central wavelength of its optical source. Although broadband, highly stable light sources used in high-precision FOGs provide excellent wavelength stability, they are typically bulky, which complicates the miniaturization of FOGs and FOG-based systems. This work investigates the use of a semiconductor laser diode with pulse-frequency current modulation in a navigation-grade FOG. It is shown that this approach provides superior central-wavelength stability (better than 1.6 ppm), resulting in a FOG angle random walk and bias instability of $0.002^{\circ}/\sqrt{\text{h}}$ and $0.009^{\circ}/\text{h}$, respectively. Comparable performance can be obtained in FOGs employing broadband, highly stable light sources.

Key words: optical sources, spectral characteristics, fiber-optic gyroscope, scale factor stability.

Материал поступил 15.09.2025