

УДК 681.787

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ШУМЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

М.В. Быкадоров<sup>а</sup>, М.Ю. Плотников<sup>а</sup>, А.В. Волков<sup>а</sup>, П.Ю. Дмитращенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
Адрес для переписки: 2kydepsta2@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 26.04.18, принята к печати 18.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Быкадоров М.В., Плотников М.Ю., Волков А.В., Дмитращенко П.Ю. Исследование влияния коэффициента усиления эрбиевого волоконно-оптического усилителя на шумы волоконно-оптического интерферометрического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 561–566. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты экспериментального исследования влияния коэффициента усиления эрбиевого волоконно-оптического усилителя на шумы волоконно-оптического интерферометрического датчика акустического давления. Волоконно-оптический датчик выполнен на основе интерферометра Майкельсона. Оптический усилитель расположен после компенсационного интерферометра, осуществляющего вспомогательную фазовую модуляцию интерференционного сигнала. Для восстановления фазового сигнала с датчика используется алгоритм гомодинной демодуляции. **Метод.** В ходе эксперимента на датчик не оказывалось внешних акустических воздействий. Осуществлялся контроль мощности выходных оптических сигналов с оптического усилителя. Шумовые сигналы с датчика после демодуляции записывались в файлы данных при различных значениях коэффициента усиления оптического усилителя. Производились спектральные оценки уровня собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика методом модифицированных периодограмм при различных значениях коэффициента усиления оптического усилителя. Полученные оценки использовались для определения зависимости уровня собственных шумов волоконно-оптического датчика от коэффициента усиления оптического усилителя. **Основные результаты.** Средние значения уровня собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика составили 64 мкрад/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 355 Гц, 68 мкрад/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 450 Гц и 66 мкрад/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 500 Гц. Результаты эксперимента по измерению уровня собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика продемонстрировали их незначительное увеличение с ростом коэффициента усиления рассматриваемого оптического усилителя с 14,6 дБ до 25,8 дБ. Увеличение уровня собственных шумов составило порядка нескольких процентов и не превысило погрешности проведенных измерений. **Практическая значимость.** Отсутствие существенных изменений в уровне собственных шумов рассматриваемого волоконно-оптического датчика при изменении коэффициента усиления оптического усилителя обусловлено подавлением шумов интенсивности используемой схемой демодуляции. Рассматриваемый оптический усилитель может быть использован для усиления оптических сигналов с массива мультиплексированных волоконно-оптических датчиков без существенного ухудшения их шумовых параметров при условии использования алгоритма гомодинной демодуляции с подавлением шумов интенсивности источника оптического излучения.

### Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, эрбиевый волоконно-оптический усилитель, коэффициент усиления, уровень собственных шумов

### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

## STUDY OF GAIN FACTOR EFFECT OF ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIER ON NOISE FLOOR LEVEL OF FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC SENSOR

M.V. Bykadorov<sup>a</sup>, M.Yu. Plotnikov<sup>a</sup>, A.V. Volkov<sup>a</sup>, P.Yu. Dmitraschenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: 2kydepsta2@gmail.com

### Article info

Received 26.04.18, accepted 18.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566

Article in Russian

**For citation:** Bykadorov M.V., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V., Dmitraschenko P.Yu.. Study of gain factor effect of erbium doped fiber amplifier on noise floor level of fiber-optic interferometric sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 561–566 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents experimental study results of the gain factor effect of an erbium doped fiber amplifier on the noise floor level of a fiber-optic interferometric acoustic sensor. Fiber-optic sensor is based on a Michelson interferometer. The optical amplifier is located behind the compensating interferometer which induces the auxiliary phase modulation to the interference signal. The homodyne demodulation algorithm is used to recover the sensor phase signal. **Method.** During the experiment there were no external acoustical impacts on the sensor. The power control of optical signals from the fiber amplifier was performed. Noise signals from the sensor were written into data files under the different values of the fiber amplifier gain factor. Spectral estimations of the noise floor level of the fiber-optic interferometric sensor were performed by the averaged modified periodogram method under the different values of the fiber amplifier gain factor. Obtained results were used to define the dependence of the noise floor level of the fiber-optic interferometric sensor on the fiber amplifier gain factor. **Main Results.** Mean noise floor levels were equal to 64  $\text{urad/Hz}^{0.5}$  at 355 Hz, 68  $\text{urad/Hz}^{0.5}$  at 450 Hz and 66  $\text{urad/Hz}^{0.5}$  at 500 Hz. Experimental results showed insignificant increase of the noise floor level of the fiber-optic interferometric sensor with the growth of the optical amplifier gain factor from 14.6 dB to 25.8 dB. The gain factor increase was about several percent and did not exceed inaccuracies of performed measurements. **Practical Relevance.** The absence of significant changes in the noise floor level of the considered fiber-optic sensor with the changing of the fiber amplifier gain factor is caused by the intensity noise suppression of the used demodulation scheme. The considered fiber amplifier might be used for the amplification of optical signals from the fiber-optic multiplexed array of fiber-optic sensors without the significant deterioration of their noise performance on condition that the homodyne demodulation algorithm with the intensity noise suppression is used.

### Keywords

fiber-optic sensor, erbium doped fiber amplifier, gain factor, noise floor level

### Acknowledgements

This work was performed in ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 03.G25.31.0245).

### Введение

Интерферометрические волоконно-оптические датчики получают все большее распространение в различных измерительных системах и продолжают совершенствоваться в части своих точностных и эксплуатационных характеристик [1, 2].

Одним из наиболее существенных достоинств волоконно-оптических датчиков является возможность их мультиплексирования – объединения в массивы сенсоров, что широко используется для решения задач геофизики и целого ряда акустических применений [3–5].

Однако мультиплексирование волоконно-оптических интерферометрических датчиков накладывает существенные ограничения на оптический бюджет подобных схем и влечет за собой необходимость использования оптических усилителей, компенсирующих оптические потери и повышающих соотношение сигнал/шум интерференционных сигналов, регистрируемых обрабатывающей электроникой. Для решения этой проблемы широко используются эрбиевые оптические усилители на оптическом волокне, легированном ионами эрбия (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) [6–10].

Предпочтение, отдаваемое использованию EDFA, обусловлено целым рядом их преимуществ: отсутствием дополнительных оптоэлектронных преобразований, простотой включения в оптическую схему и диапазоном рабочих длин волн, соответствующих третьему диапазону прозрачности оптического волокна в области 1550 нм [11].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния коэффициента усиления эрбиевого оптического усилителя INST-EDFA-uM-C-17-0-FC/APC<sup>1</sup> производства Shenzhen Instantware Information Technology Co., Ltd (Китай), предназначенного для работы с импульсными оптическими сигналами, на шумы волоконно-оптического интерферометрического датчика акустического давления.

<sup>1</sup> INST C Band Pulse EDFA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.insttek.com/4.html>. Яз. англ. (дата обращения 17.05.2018).

### Принцип работы волоконно-оптического интерферометрического датчика

Оптическая схема исследуемого интерферометрического волоконно-оптического датчика акустического давления, выполненного на основе интерферометра Майкельсона, представлена на рис. 1, а.

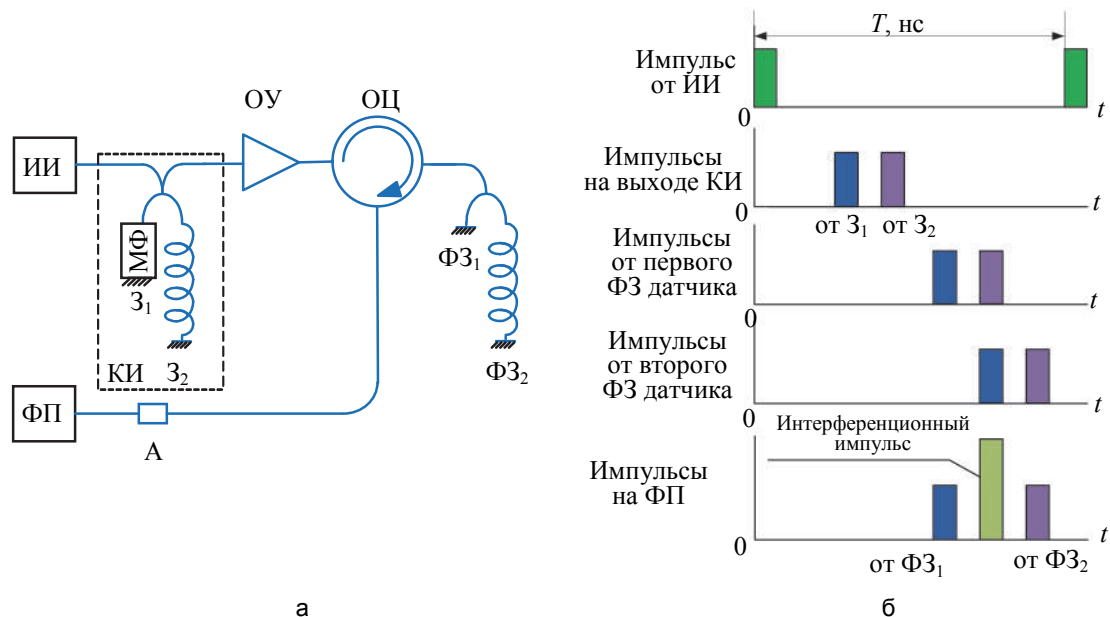


Рис. 1. Схема интерферометрического волоконно-оптического датчика акустического давления, выполненного на основе интерферометра Майкельсона (а); временные диаграммы работы волоконно-оптического датчика на фарадеевских зеркалах (б).

ИИ – источник излучения, ФМ – фазовый модулятор, З – зеркало, ОУ – оптический усилитель, ОЦ – оптический циркулятор, ФЗ – фарадеевское зеркало, А – аттенюатор, ФП – фотоприемник, КИ – компенсационный интерферометр

Схема, представленная на рис. 1, а, работает в импульсном режиме оптического излучения. В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (VCSEL) с центральной длиной волны 1550 нм. Оптические импульсы с источника излучения (ИИ) длительностью 10 нс и периодом следования ( $T$ ) 500 нс (рис. 1, б) попадают в компенсационный интерферометр (КИ), на выходе из которого после отражения от зеркал  $Z_1$  и  $Z_2$  из каждого проходящего импульса образуется пара импульсов, один из которых дополнительно промодулирован по фазе косинусоидальным сигналом на частоте 50 кГц для дальнейшей реализации метода гомодинной демодуляции интерференционных сигналов [12, 13]. Временная задержка между импульсами равна удвоенному времени распространения оптического излучения по длинному плечу интерферометра. Далее рассматриваемая пара оптических импульсов усиливается оптическим усилителем (ОУ), проходит через оптический циркулятор (ОЦ) и попадает в чувствительный интерферометр. Фарадеевские зеркала  $\Phi Z_1$  и  $\Phi Z_2$ , используемые в чувствительном интерферометре, решают проблему поляризационного затухания интерференционных сигналов [14]. В результате этого, после отражения от ФЗ и обратного прохождения через ОЦ на фотоприемник (ФП) с волоконно-оптического датчика приходят три оптических импульса, центральный из которых является интерференционным и содержит информацию об акустическом воздействии на чувствительное плечо интерферометра (рис. 1, б). Далее интерференционный сигнал оцифровывается и обрабатывается схемой гомодинной демодуляции, реализованной на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) Altera Cyclone V платы обработки сигналов [15, 16].

### Результаты эксперимента

В ходе эксперимента ОУ был подключен к компьютеру через СОМ-порт. С помощью программы от производителя ОУ осуществлялась перестройка его тока накачки в пределах от 50 мА до 470 мА, таким образом, осуществлялась регулировка его коэффициента усиления с 14,6 дБ до 25,8 дБ. Выходная мощность оптического излучения с ОУ контролировалась посредством встроенного в ОУ фотоприемника. Оптическая мощность, поступающая с ИИ на ОУ, не менялась в ходе эксперимента. Уровень мощности оптических сигналов, проходящих на ФП платы обработки сигналов, контролировался с помощью осциллографа и удерживался на одном уровне при изменении тока накачки ОУ с помощью перестраиваемого аттенюатора (А).

В ходе эксперимента на датчик не оказывалось внешних акустических воздействий. Выходные сигналы с датчика после демодуляции записывались в файлы данных при различных значениях коэффи-

циента усиления ОУ. Далее записанные данные обрабатывались в среде MATLAB методом модифицированных периодограмм для определения уровня собственных шумов датчика в диапазоне частот до 500 Гц [17, 18]. Для каждого значения тока накачки уровень шумов датчика оценивался по трем измерениям, полученные результаты усреднялись.

Результаты измерений уровня собственных шумов интерферометрического датчика на трех частотах, выбранных согласно ГОСТ<sup>1</sup>, и зависимость коэффициента усиления оптического усилителя от тока накачки представлены на рис. 2. Выбор частот 355 Гц, 450 Гц и 500 Гц для проведения анализа также был обусловлен наличием акустических и вибрационных помех в низкочастотной области в лаборатории во время проведения эксперимента.

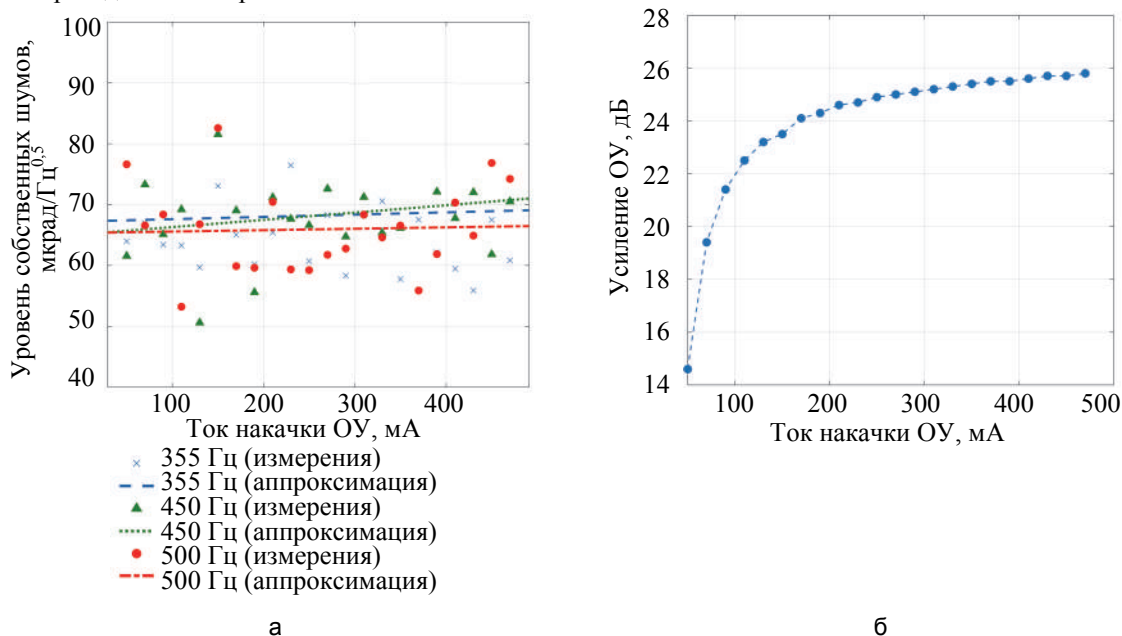


Рис. 2. Уровень собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика в зависимости от тока накачки оптического усилителя (а); зависимость коэффициента усиления оптического усилителя от тока накачки (б)

Согласно результатам эксперимента, представленным на рис. 2, а, б, средние значения уровня собственных шумов датчика составили  $64 \text{ мкрад/Гц}^{0,5}$  на частоте 355 Гц,  $68 \text{ мкрад/Гц}^{0,5}$  на частоте 450 Гц и  $66 \text{ мкрад/Гц}^{0,5}$  на частоте 500 Гц. Разброс среднеквадратичного отклонения (СКО) измеренных значений уровней собственных шумов датчика составил 8,1% на частоте 355 Гц, 10,8% на частоте 450 Гц и 11,1% на частоте 500 Гц. Разброс уровней собственных шумов предположительно обусловлен неидеальной акустической и вибрационной изоляцией датчика от внешних воздействий во время проведения эксперимента.

Результаты эксперимента по измерению уровня собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика, представленные на рис. 2, а, показали их незначительное увеличение с ростом коэффициента усиления рассматриваемого ОУ с 14,6 дБ до 25,8 дБ. Увеличение уровня собственных шумов составило порядка нескольких процентов и не превысило погрешности измерений (СКО уровня собственных шумов).

### Заключение

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния коэффициента усиления эрбиевого оптического усилителя, предназначенного для работы с импульсными оптическими сигналами, на шумы волоконно-оптического интерферометрического датчика акустического давления.

В ходе эксперимента увеличение уровня собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика с ростом коэффициента усиления рассматриваемого эрбиевого волоконно-оптического усилителя с 14,6 дБ до 25,8 дБ составило порядка нескольких процентов и не превысило погрешности измерений. Таким образом, результаты проведенного эксперимента позволили утверждать, что исследуемый оптический усилитель в указанных режимах работы не оказал существенного влияния на уровень собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика.

Согласно работе [19], основным источником шумов в эрбиевых оптических усилителях является усиленная спонтанная эмиссия. Влияние спонтанной эмиссии заключается в добавлении флуктуаций к

<sup>1</sup> ГОСТ 12090-80 Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды. Введен 01.01.1981. М.: Издательство стандартов, 1980. 3 с.

мощности усиленного оптического сигнала, которые впоследствии преобразуются во флуктуации мощности интерференционного сигнала в процессе его фотодетектирования. Известно, что флуктуации мощности оптического излучения на выходе оптического усилителя растут с увеличением его коэффициента усиления (тока накачки) [19]. При этом отношение сигнал/шум усиленного сигнала ухудшается на 3 дБ даже для идеального усилителя, а для большинства существующих усилителей ухудшение может быть порядка 6 дБ [20].

Отсутствие существенных изменений в уровне собственных шумов рассматриваемого волоконно-оптического датчика при изменении коэффициента усиления оптического усилителя обусловлено подавлением шумов интенсивности используемой схемой демодуляции. Такое подавление шумов происходит вследствие деления квадратурных составляющих интерференционного сигнала в процессе его обработки [13, 21].

Таким образом, рассматриваемый оптический усилитель может быть использован для усиления оптических сигналов с массива мультиплексированных волоконно-оптических датчиков без существенного ухудшения их шумовых параметров при условии использования алгоритма гомодинной демодуляции с подавлением шумов интенсивности источника оптического излучения.

### Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Получены спектральные зависимости излучения полупроводниковых лазеров видимого диапазона от температуры активной среды, изменяющейся от 300 до 370 К.
2. Предложен методика диагностирования состояния полупроводниковых лазерных модулей без механического вмешательства, а только посредством анализом их спектральной характеристики.
3. Показано, что длина когерентности для полупроводникового лазерного модуля определяется не полушириной всего спектра, а полушириной отдельно взятой моды излучения. Реальная длина когерентности отличается от теоретически рассчитанной по ширине всего спектра на 2–3 порядка.

Кроме этого, показано, что s- и p-поляризованные лучи DPSS-лазера имеют одинаковый модовый состав с неполяризованным излучением в видимой части спектра. Изменение спектральных характеристик данного типа лазера от температуры активной среды не обнаружено.

### Литература

1. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 518 с.
2. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2<sup>nd</sup> ed. CRC Press, 2008. 492 p.
3. Nash P.J., Cranch G.A., Hill D.J. Large-scale multiplexed fibre-optic arrays for geophysical applications // *Proceedings of SPIE*. 2000. V. 4202. P. 55–65.
4. Cranch G.A., Nash P.J., Kirkendall C.K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications // *IEEE Sensors Journal*. 2003. V. 3. N 1. P. 19–30. doi: 10.1109/JSEN.2003.810102
5. Nakstad H., Kringlebotn J.T. Realisation of a full-scale fibre-optic ocean bottom seismic system // *Proceedings of SPIE*. 2008. V. 7004. doi: 10.1117/12.791158
6. Liao Y., Austin E., Nash P.J., Kingsley S.A., Richardson D.J. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems // *Journal of Lightwave Technology*. 2013. V. 31. N 6. P. 882–888. doi: 10.1109/JLT.2012.2234084
7. Cranch G.A. et al. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2003. V. 15. N 11. P. 1579–1581. doi: 10.1109/LPT.2003.818686
8. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM // *Journal of Lightwave Technology*. 2001. V. 19. P. 687–699. doi: 10.1109/50.923482
9. Cranch G.A., Nash P.J. High multiplexing gain using TDM and WDM in interferometric sensor arrays // *Proceedings of SPIE*. 1999. V. 3860. P. 531–537.
10. Kersey A.D., Dandridge A., Davis A.R., Kirkendall C.K., Marrone M.J., Gross D.G. 64-element time-division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry // *Optical Fiber Communications*. 1996. P. 270–271.
11. Becker P.M., Olsson A.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. Academic Press,

### References

1. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. E. Udd. NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p. doi: 10.1002/9781118014103
2. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2<sup>nd</sup> ed. CRC Press, 2008, 492 p.
3. Nash P.J., Cranch G.A., Hill D.J. Large-scale multiplexed fibre-optic arrays for geophysical applications. *Proceedings of SPIE*, 2000, vol. 4202, pp. 55–65.
4. Cranch G.A., Nash P.J., Kirkendall C.K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications. *IEEE Sensors Journal*, 2003, vol. 3, no. 1, pp. 19–30. doi: 10.1109/JSEN.2003.810102
5. Nakstad H., Kringlebotn J.T. Realisation of a full-scale fibre-optic ocean bottom seismic system. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 7004. doi: 10.1117/12.791158
6. Liao Y., Austin E., Nash P.J., Kingsley S.A., Richardson D.J. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 6, pp. 882–888. doi: 10.1109/JLT.2012.2234084
7. Cranch G.A. et al. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, vol. 15, no. 11, pp. 1579–1581. doi: 10.1109/LPT.2003.818686
8. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, vol. 19, pp. 687–699. doi: 10.1109/50.923482
9. Cranch G.A., Nash P.J. High multiplexing gain using TDM and WDM in interferometric sensor arrays. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3860, pp. 531–537.
10. Kersey A.D., Dandridge A., Davis A.R., Kirkendall C.K., Marrone M.J., Gross D.G. 64-element time-division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry. *Optical Fiber Communications*, 1996, pp. 270–271.
11. Becker P.M., Olsson A.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber*

- 1999, 451 p.
12. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2191. P. 324–336.
  13. Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалева В.Е., Куликов А.В., Киреев А.Ю. Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 6. С. 1008–1014. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
  14. Kersey A.D., Marrone M.J., Davis M.A. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer // *Electronics Letters*. 1991. V. 27. N 6. P. 518–520. doi: 10.1049/el:19910325
  15. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150. doi: 10.1109/JSEN.2017.2704287
  16. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Y., Plotnikov A.V., Mekhregin M.V., Kireenkov A.Y. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2018. V. 18. N 5. P. 1985–1992. doi: 10.1109/JSEN.2018.2792540
  17. Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б. Основы цифровой обработки сигналов. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с.
  18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 758 с.
  19. Blotekjaer K. Fundamental noise sources that limit the ultimate resolution of fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*. 1998. V. 3555. P. 1–12. doi: 10.1117/12.318192
  20. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2003. 495 с.
  21. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6292. Art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
- Amplifiers: Fundamentals and Technology*. Academic Press, 1999, 451 p.
12. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2191, pp. 324–336.
  13. Belikin M.N., Plotnikov M.Yu., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Kireenkov A.Yu. Experimental comparison of homodyne demodulation algorithms for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1008–1014. (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
  14. Kersey A.D., Marrone M.J., Davis M.A. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer. *Electronics Letters*, 1991, vol. 27, no. 6, pp. 518–520. doi: 10.1049/el:19910325
  15. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. doi: 10.1109/JSEN.2017.2704287
  16. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Y., Plotnikov A.V., Mekhregin M.V., Kireenkov A.Y. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1985–1992. doi: 10.1109/JSEN.2018.2792540
  17. Solonina A.I., Ulakhovich D.A., Arbuzov S.M., Solov'eva E.B. *Fundamentals of Digital Signal Processing*. 2<sup>nd</sup> ed. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 768 p. (in Russian)
  18. Sergienko A.B. *Digital Signal Processing*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, 758 p. (in Russian)
  19. Blotekjaer K. Fundamental noise sources that limit the ultimate resolution of fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3555, pp. 1–12. doi: 10.1117/12.318192
  20. Freeman R.L. *Fiber-Optic Systems for Telecommunications*. NY, Wiley, 2002.
  21. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6292, art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455

### Авторы

**Быкадоров Матвей Владимирович** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9674-7237, 2kydepsta2@gmail.com

**Плотников Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

**Волков Антон Валерьевич** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194565170, ORCID ID: 0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com

**Дмитращенко Павел Юрьевич** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9250-4286, ttallika@mail.ru

### Authors

**Matvey V. Bykadorov** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9674-7237, 2kydepsta2@gmail.com

**Mikhail Yu. Plotnikov** – PhD, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

**Anton V. Volkov** – engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194565170, ORCID ID: 0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com

**Pavel Yu. Dmitraschenko** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9250-4286, ttallika@mail.ru