

УДК 681.787

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-987-993

МИНИМИЗАЦИЯ УРОВНЯ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ МАССИВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ КАСКАДА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

М.В. Быкадоров, М.Ю. Плотников, А.Ю. Киреев, А.А. Макаренко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: 2kydepsta2@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.07.19, принята к печати 11.09.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Быкадоров М.В., Плотников М.Ю., Киреев А.Ю., Макаренко А.А. Минимизация уровня собственных шумов массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков путем регулировки параметров каскада операционных усилителей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 987–993. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-987-993

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости уровня собственных шумов массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков от коэффициентов усиления операционных усилителей, расположенных на плате обработки интерференционных сигналов и объединенных последовательно в единый каскад. **Метод.** Массив волоконно-оптических датчиков построен на двухлучевых волоконных интерферометрах Майкельсона, объединенных в массив с мультиплексированием по времени. Каскад операционных усилителей состоит из усилителя с токовой обратной связью (трансимпедансный усилитель), который преобразует фототок с фотоприемника в напряжение, и программируемого операционного усилителя. В процессе работы схемы сигнал с фотоприемного устройства попадает на трансимпедансный усилитель, который работает в двух режимах с коэффициентами усиления 0 и 6 дБ, и затем на программируемый операционный усилитель, который дополнительно усиливает входящий электрический сигнал в диапазоне 0–40 дБ. Далее усиленные сигналы с каскада подаются на аналого-цифровой преобразователь, после чего демодулируются. В ходе эксперимента исследуемый массив волоконно-оптических датчиков был изолирован от внешних виброакустических воздействий. Сигналы с четырех волоконно-оптических датчиков после демодуляции при различных значениях коэффициентов усиления каскада операционных усилителей записывались в файлы данных, после чего оценивался уровень собственных шумов датчиков с помощью метода модифицированных периодограмм в зависимости от коэффициентов усиления каскада операционных усилителей. **Основные результаты.** Минимальные средние значения уровня собственных шумов волоконно-оптических интерферометрических датчиков в режиме с усилением 6 дБ операционного усилителя с токовой обратной связью и усилением 12 дБ программируемого операционного усилителя составили 65 мкрад/Гц^{0,5} на частоте 1000 Гц, а в режиме с усилением 0 дБ (без усиления) операционного усилителя с токовой обратной связью и усилением программируемого операционного усилителя — 20 дБ 80 мкрад/Гц^{0,5} на частоте 1000 Гц. **Практическая значимость.** Было продемонстрировано наличие оптимальной рабочей области в режиме с усилением 6 дБ трансимпедансного усилителя в диапазоне коэффициентов усилений 5–20 дБ программируемого операционного усилителя, при которой наблюдаются наименьшие средние значения уровней собственных шумов исследуемого массива волоконно-оптических датчиков на уровне 65–70 мкрад/Гц^{0,5}. Данный метод с использованием операционных усилителей можно применять в массиве волоконно-оптических интерферометрических датчиков для усиления оптических импульсов, входящих на фотоприемник, без существенного ухудшения их шумовых характеристик при условии выбора оптимальной рабочей области.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, операционный 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).

MINIMIZATION OF NOISE FLOOR LEVEL OF FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC SENSOR ARRAY BY ADJUSTMENT OF OPERATIONAL AMPLIFIER CASCADE PARAMETERS

M.V. Bykadorov, M.Yu. Plotnikov, A.Yu. Kireenkov, A.A. Makarenko

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: 2kydepsta2@gmail.com

Article info

Received 19.07.19, accepted 11.09.19
Article in Russian

For citation: Bykadorov M.V., Plotnikov M.Yu., Kireenkov A.Yu., Makarenko A.A. Minimization of noise floor level of fiber-optic interferometric sensor array by adjustment of operational amplifier cascade parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 987–993 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-987-993

Abstract

Subject of Research. The paper presents results of the experimental study on the dependence of the noise floor level of a fiber-optic interferometric sensor array on the gain factor of operational amplifiers located on the signal processing board and connected in series into a single cascade. **Method.** The fiber-optic interferometric sensor array is based on Michelson interferometers, arrayed with time division multiplexing. Operational amplifier cascade consists of a variable operational amplifier and a current feedback operational amplifier (transimpedance amplifier), which converts the photocurrent from the photodiode to voltage. A signal from the photodetector is transmitted to transimpedance amplifier, which has two operating modes with gain factors equal to 0 and 6 dB, and then to programmed operational amplifier, which additionally amplifies the incoming electric signal in the range from 0 to 40 dB. Further, enhanced signals from the amplifier cascade are fed to analog-to-digital converter and then they are demodulated. During the experiment the fiber-optic sensor array under research was closed off from external vibroacoustic impacts on the sensor. Noise signals from four sensors were recorded after demodulation into data files at the various values of gain factors of operational amplifiers. Spectral estimations of noise floor levels of the fiber-optic interferometric sensors were performed by the averaged modified periodogram method depending on the gain factors of operational amplifiers. **Main Results.** The following minimal average noise floor levels were obtained: 65 $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{0.5}$ at 1000 Hz with the gain factor of the current feedback operational amplifier equal to 6 dB and the gain factor of the variable operational amplifier equal to 12 dB, and 80 $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{0.5}$ at 1000 Hz with the gain factor of the current feedback operational amplifier equal to 0 dB and the gain factor of the variable operational amplifier equal to 20 dB. **Practical Relevance.** The study has shown that optimal operating conditions are achieved with the gain factor of the current feedback operational amplifier equal to 6 dB and in the range of the gain factor of the variable operational amplifier from 5 dB to 20 dB, which provided the minimal average noise floor level of the fiber-optic interferometric sensors at the level of 65–70 $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{0.5}$. The proposed method of applying operational amplifiers is usable for the amplification of optical signals from the fiber-optic multiplexed sensor array without significant deterioration of their noise performance in case of the optimal operating domain selection.

Keywords

fiber-optic sensor, operational 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

Волоконно-оптические интерферометрические датчики (ВОИД) используются для точных измерений широкого ряда различных физических величин, таких как скорость вращения, гидроакустическое давление, ускорение и т. д. [1, 2]. Помимо своих преимуществ перед другими измерительными системами, таких как невосприимчивость к электромагнитным воздействиям и высокая чувствительность [3, 4], ВОИД обладают возможностью мультиплексирования, что делает их привлекательными для ряда гидроакустических применений — геофизической разведки полезных ископаемых [5–10] и специальных систем охраны акваторий морских портов [11–14].

Мультиплексирование ВОИД неизбежно приводит к росту оптических потерь в оптической схеме массива волоконно-оптических датчиков. Это влечет за собой необходимость усиления интерференционных сигналов, приходящих на фотоприемное устройство, для компенсации оптических потерь и улучшения соотношения сигнал/шум интерференционных сигналов. Помимо оптических усилителей, для решения этой задачи могут использоваться и различные настраиваемые операционные усилители (ОУ), установленные на плате обработки сигналов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния коэффициентов усиления каскада операционных усилителей на собственные шумы массива ВОИД.

В работе рассматривается работа операционного усилителя с токовой обратной связью (трансимпедансный усилитель, ОУ ТОС) OPA857IRGT¹ производства компании Texas Instruments и программируемого

¹ OPA857 Ultralow-Noise, Wideband, Selectable-Feedback Resistance Transimpedance Amplifier [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ti.com/product/OPA857>. Яз. англ.

операционного усилителя (ПОУ) HMC960LP4E¹ производства компании Analog devices, объединенных в единый каскад на плате обработки интерференционных сигналов. Предпочтение, отдаваемое использованию ОУ ТОС ОРА857IRGT, обусловлено его низкими шумами, высоким быстродействием и высоким динамическим диапазоном. В широком диапазоне частот ПОУ HMC960LP4E позволяет усиливать входящий сигнал от 0 до 40 дБ с шагом 0,5 дБ и, кроме того, также обладает низкими собственными шумами.

Моделирование процесса демодуляции интерференционных сигналов

Для понимания того, как изменение отношения сигнал/шум интерференционных сигналов будет влиять на уровень собственных шумов волоконно-оптических датчиков, необходимо учитывать, что интерференционные сигналы с датчиков подвергаются процессу демодуляции для восстановления измеряемых фазовых сигналов. Сам процесс демодуляции детально описан в работах [15–20].

Для определения зависимости уровня шумов в выходных сигналах интерферометрических датчиков от уровня шумов интерференционных сигналов было проведено математическое моделирование, в ходе которого к интерференционному фазомодулированному сигналу добавлялись аддитивные шумы различной величины, при этом считается интерференционный сигнал, что описывается выражением (1):

$$I(t) = A + B\cos(C\cos(\omega_0 t) + \varphi_0) + N_{add}, \tag{1}$$

где A и B — постоянные, определяемые мощностью оптического излучения и видимостью интерференционного сигнала, приходящего на фотоприемник, ед. мл. разр.; C — значение глубины фазовой модуляции, рад; N_{add} — аддитивный шум, ед. мл. разр.; ω_0 — циклическая частота сигнала опорного генератора, рад/с, рад; φ_0 — положение рабочей точки интерферометра, рад.

Далее зашумленный интерференционный сигнал обрабатывался схемой демодуляции PGC-Atan [15–20], и в результате математического моделирования в среде MATLAB оценивался уровень собственных шумов выходного сигнала на частоте 1000 Гц в зависимости от уровня аддитивного шума N_{add} . В ходе моделирования величина добавляемых к интерференционному сигналу аддитивных шумов изменялась от 0 до 1000 ед. мл. разр. (отн. ед.), при этом сам сигнал считался оцифрованным 16-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и имел амплитуду $B = 30000$ ед. мл. разр. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

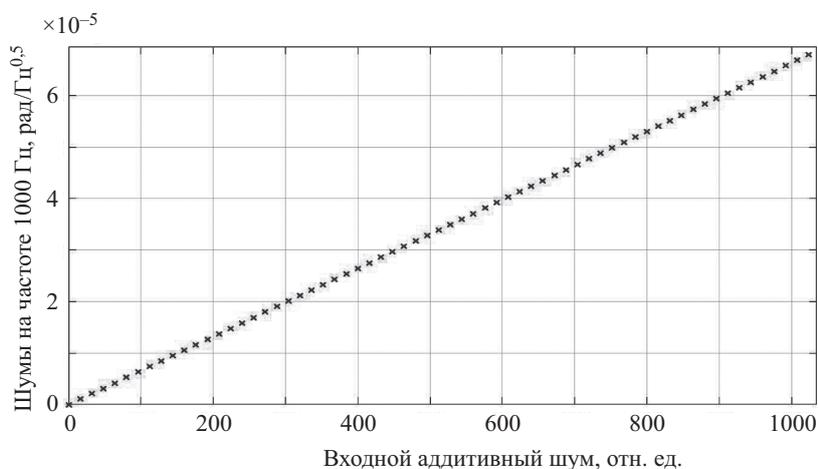


Рис. 1. Уровень собственных шумов волоконно-оптического интерферометрического датчика в зависимости от входного аддитивного шума

Согласно рис. 1, линейное увеличение уровня шумов в интерференционном сигнале приводит к линейному увеличению шумов в выходном сигнале после демодуляции. Полученная зависимость позволяет перейти к экспериментальным исследованиям и проанализировать, как меняется отношение сигнал/шум интерференционного сигнала при различных режимах работы каскада операционных усилителей, а также оценить, не вносят ли рассматриваемые в работе операционные усилители дополнительных шумов.

Результаты эксперимента

Для получения экспериментальной зависимости уровня собственных шумов массива ВОИД от коэффициентов усиления каскада ОУ использовался массив из четырех ВОИД, построенный на двухлучевых волоконных интерферометрах Майкельсона, объединенных в массив с мультиплексированием по времени.

¹ HMC960LP4E [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.analog.com/en/products/hmc960.html#product-overview>. Яз. англ.

Каскад операционных усилителей был расположен на плате обработки сигналов непосредственно после фотоприемного устройства и включал в себя трансимпедансный усилитель (ОУ ТОС) [21, 22], который преобразует фототок в напряжение, и программируемый операционный усилитель (ПОУ) [23]. Сигнал с фотоприемного устройства попадал непосредственно на ОУ ТОС, который работал в двух режимах — с коэффициентами усиления 0 и 6 дБ, и затем на ПОУ, который дополнительно усиливал входящий электрический сигнал в диапазоне 0–40 дБ. Далее усиленные сигналы с каскада ОУ подавались на АЦП. Оцифрованный сигнал демодулировался схемой обработки, реализованной на программируемой логической интегральной схеме [15–20].

В ходе эксперимента исследуемый массив ВОИД был изолирован от внешних виброакустических воздействий. ОУ ТОС работал в двух режимах с коэффициентами усиления 0 и 6 дБ, коэффициент усиления ПОУ менялся в диапазоне 0–40 дБ с шагом 2 дБ. К плате обработки был также подключен осциллограф, с помощью которого оценивалась амплитуда интерференционных сигналов и контролировалось насыщение фотоприемного устройства (рис. 2).

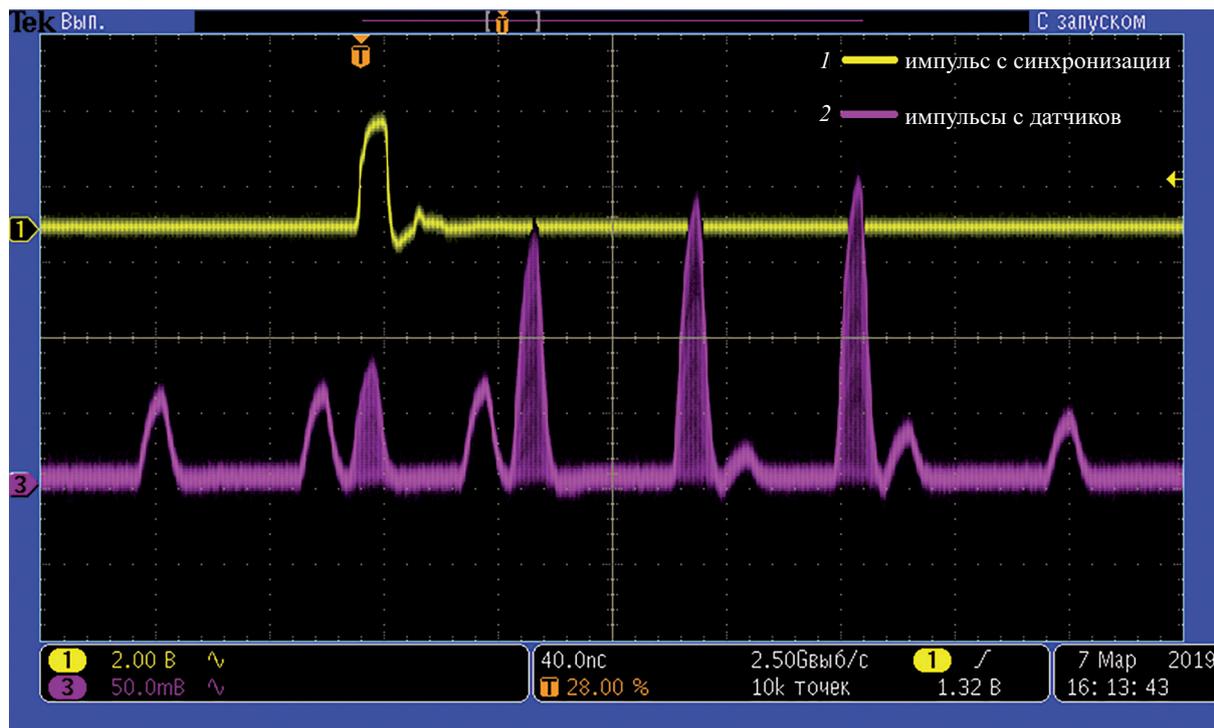


Рис. 2. Осциллограмма последовательности оптических импульсов с массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков

Демодулированные сигналы с четырех волоконно-оптических датчиков при различных значениях коэффициентов усиления ОУ записывались в файлы данных на персональном компьютере, по которым впоследствии оценивался уровень собственных шумов датчиков с помощью метода модифицированных периодограмм [24, 25].

Усредненные результаты измерений уровня собственных шумов массива ВОИД на частоте 1000 Гц при различных значениях коэффициентов усиления ОУ представлены на рис. 3. Выбор частоты 1000 Гц для проведения анализа был произведен для минимизации влияния низкочастотных акустических и вибрационных помех, присутствовавших в лаборатории, на результаты эксперимента.

Согласно результатам эксперимента, представленным на рис. 3, минимальные средние значения уровня собственных шумов массива ВОИД составили около $65 \text{ мкрад/Гц}^{0.5}$ на частоте 1000 Гц в режиме ОУ ТОС с усилением 6 дБ и усилением ПОУ 12 дБ. Минимальные средние значения уровня собственных шумов массива ВОИД в режиме ОУ ТОС с усилением 0 дБ (без усиления) составили в среднем $80 \text{ мкрад/Гц}^{0.5}$ на частоте 1000 Гц при коэффициенте усиления ПОУ 20 дБ.

Повышение среднего уровня собственных шумов при значениях коэффициента усиления ПОУ выше 25 дБ связано с насыщением фотоприемного устройства и переполнением разрядной сетки АЦП и, как следствие, некорректной работе алгоритма демодуляции.

Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что в режиме с усилением 6 дБ ОУ ТОС и с коэффициентом усиления ПОУ от 5 до 20 дБ достигается минимум собственных шумов исследуемого массива ВОИД.

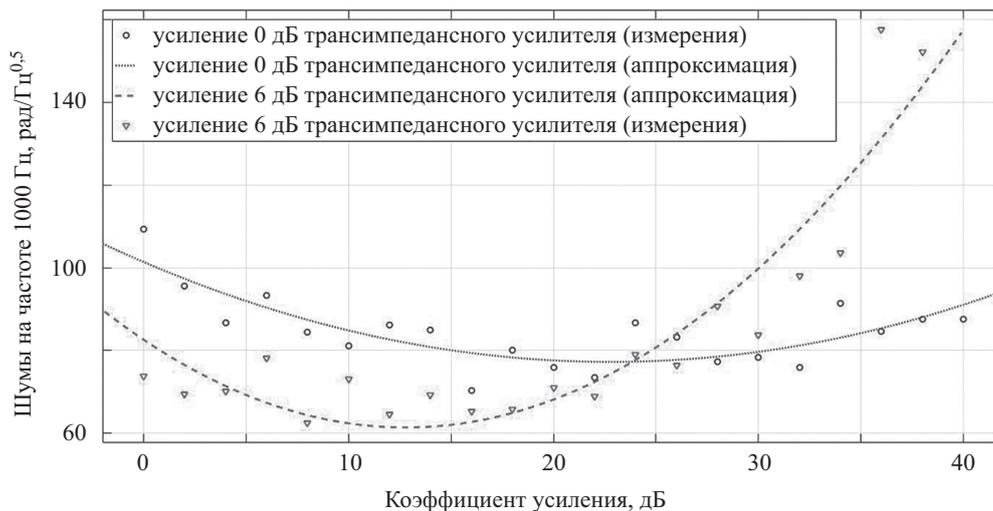


Рис. 3. Усредненный уровень собственных шумов волоконно-оптических интерферометрических датчиков в зависимости от коэффициентов усиления программируемого операционного усилителя и трансимпедансного усилителя

Следует также отметить, что характер зависимости уровня собственных шумов массива ВОИД от коэффициентов усиления каскада ОУ нелинеен, что, с учетом результатов проведенного математического моделирования говорит о внесении ОУ дополнительных шумов в интерференционный сигнал. Таким образом, выбор режима работы каскада ОУ оказывает существенное влияние на уровень шумов массива ВОИД.

Заключение

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния коэффициентов усиления операционных усилителей на собственные шумы массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков.

В ходе экспериментальных исследований были получены минимальные средние значения уровней собственных шумов волоконно-оптических датчиков на уровне 65 мкрад/Гц^{0,5} (частота 1000 Гц, усиление операционного усилителя с токовой обратной связью 6 дБ, усиление программируемого операционного усилителя 12 дБ). При выключенном операционном усилителе с токовой обратной связью (усиление 0 дБ) минимальные средние значения уровней собственных шумов волоконно-оптических датчиков составили 80 мкрад/Гц^{0,5} (частота 1000 Гц, усиление программируемого операционного усилителя 20 дБ). Таким образом, оптимальным режимом работы операционных усилителей, обеспечивающим минимальный уровень собственных шумов массива волоконно-оптических датчиков, является включение операционного усилителя с токовой обратной связью с усилением 6 дБ и включение программируемого операционного усилителя в диапазоне коэффициентов усиления от 5 до 20 дБ.

Снижение уровня собственных шумов массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков в режиме с усилением 6 дБ операционного усилителя с токовой обратной связью предположительно связано с тем, что, согласно его документации, среднеквадратичный токовый шум в режиме усиления 6 дБ операционного усилителя с токовой обратной связью равен 15 нА, а в режиме 0 дБ (без усиления) — 25 нА. Как следствие, наименьший вклад трансимпедансного усилителя в собственные шумы массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков достигается при усилении 6 дБ.

Программируемый операционный усилитель, напротив, при коэффициенте усиления 0 дБ имеет, согласно документации, шумы 9 нВ/Гц^{0,5}, а при коэффициенте усиления 40 дБ шумы достигают 125 нВ/Гц^{0,5}.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, осуществляя настройку каскада операционных усилителей, можно добиться снижения уровня собственных шумов массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков.

Литература

1. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory // *Journal of the Washington Academy of Sciences*. 2004. V. 90. N 3. P. 40–57.
2. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. V. 37. N 18. P. R197–R216. doi: 10.1088/0022-3727/37/18/R01

References

1. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 2004, vol. 90, no. 3, pp. 40–57.
2. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, vol. 37, no. 18, pp. R197–R216. doi: 10.1088/0022-3727/37/18/R01

3. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists / Ed. by E. Udd, W.B. Spillman, Jr. John Wiley & Sons, 2011. 512 p. doi: 10.1002/9781118014103
4. Lee B., Jeong Y. Interrogation techniques for fiber grating sensors and the theory of fiber gratings // *Fiber Optic Sensors, Second Edition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008. P. 253–331. doi: 10.1201/9781420053661
5. Kirkendall C., Barock T., Tveten A.B., Dandridge A. *Fiber optic towed arrays*. Naval Research Lab Washington Dc Optical Sciences Div., 2007.
6. Nash P.J., Cranch G.A., Hill D.J. Large scale multiplexed fibre-optic arrays for geophysical applications // *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2000. V. 4202. P. 55–66. doi: 10.1117/12.411727
7. Paulsson B.N.P., Toko J.L., Thornburg J.A., Slopko F., He R., Zhang Ch. A high performance fiber optic seismic sensor system // *Proc. 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. 2013.
8. Berg C., Langhammer J., Nash P. Lifetime stability and reliability of fibre-optic seismic sensors for permanent reservoir monitoring // *Proc. Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82nd Annual Meeting 2012 (SEG)*. 2012. P. 1472–1476. doi: 10.1190/segam2012-1236.1
9. Nakstad H., Kringlebotn J.T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system // *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2008. V. 7004. P. 700436. doi: 10.1117/12.791158
10. Souto F. Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare // *Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity*. 2013. P. 297–301.
11. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks // *Measurement Science and Technology*. 2011. V. 22. N 5. P. 052001. doi: 10.1088/0957-0233/22/5/052001
12. Hill D., Nash P. Fiber-optic hydrophone array for acoustic surveillance in the littoral // *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2005. V. 5780. P. 1–10. doi: 10.1117/12.607550
13. Borowski B., Sutin A., Roh H.S., Bunin B. Passive acoustic threat detection in estuarine environments // *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2008. V. 6945. P. 694513. doi: 10.1117/12.779177
14. Meggitt D., Wilson J., Warren D. Project Centurion: installation of lightweight acoustic arrays in shallow water // *Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE*. 2005. P. 1339–1344. doi: 10.1109/OCEANS.2005.1639940
15. Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалеv В.Е., Куликов А.В., Кирсенков 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
16. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // *Advances in Optical Technologies*. 2014. P. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
17. 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
18. Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovsky I.K. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications // *IEEE Sensors Journal*. 2019. V. 19. N 9. P. 3376–3382. doi: 10.1109/JSEN.2019.2894323
19. 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
3. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists* / Ed. by E. Udd, W.B. Spillman, Jr. John Wiley & Sons, 2011, 512 p. doi: 10.1002/9781118014103
4. Lee B., Jeong Y. Interrogation techniques for fiber grating sensors and the theory of fiber gratings. *Fiber Optic Sensors, Second Edition*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2008, P. 253–331. doi: 10.1201/9781420053661
5. Kirkendall C., Barock T., Tveten A.B., Dandridge A. *Fiber optic towed arrays*. Naval Research Lab Washington Dc Optical Sciences Div., 2007.
6. Nash P.J., Cranch G.A., Hill D.J. Large scale multiplexed fibre-optic arrays for geophysical applications. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2000, vol. 4202, pp. 55–66. doi: 10.1117/12.411727
7. Paulsson B.N.P., Toko J.L., Thornburg J.A., Slopko F., He R., Zhang Ch. A high performance fiber optic seismic sensor system. *Proc. 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2013.
8. Berg C., Langhammer J., Nash P. Lifetime stability and reliability of fibre-optic seismic sensors for permanent reservoir monitoring. *Proc. Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82nd Annual Meeting 2012 (SEG)*, 2012, pp. 1472–1476. doi: 10.1190/segam2012-1236.1
9. Nakstad H., Kringlebotn J.T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2008, vol. 7004, pp. 700436. doi: 10.1117/12.791158
10. Souto F. Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare. *Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity*, 2013. P. 297–301.
11. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 5, pp. 052001. doi: 10.1088/0957-0233/22/5/052001
12. Hill D., Nash P. Fiber-optic hydrophone array for acoustic surveillance in the littoral. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2005, vol. 5780, pp. 1–10. doi: 10.1117/12.607550
13. Borowski B., Sutin A., Roh H.S., Bunin B. Passive acoustic threat detection in estuarine environments. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2008, vol. 6945, pp. 694513. doi: 10.1117/12.779177
14. Meggitt D., Wilson J., Warren D. Project Centurion: installation of lightweight acoustic arrays in shallow water. *Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, 2005, pp. 1339–1344. doi: 10.1109/OCEANS.2005.1639940
15. 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
16. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, pp. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
17. 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
18. Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovsky I.K. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications. *IEEE Sensors Journal*, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 3376–3382. doi: 10.1109/JSEN.2019.2894323
19. 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*, vol. 18, no. 4, pp. 561–566. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566
20. Plotnikov M.Yu. *Fiber-optic hydrophone*. Cand. Sc. thesis St.Petersburg, NRU ITMO, 2014. (in Russian)

20. Плотников М.Ю. Волоконно-оптический гидрофон: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2014.
21. Park S.M., Yoo H.J. 1.25-Gb/s regulated cascode CMOS transimpedance amplifier for gigabit ethernet applications // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2004. V. 39. N 1. P. 112–121. doi: 10.1109/JSSC.2003.820884
22. Park S.M. Gigabit CMOS transimpedance amplifiers for optical communication applications // *Proc. 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS 2003)*. V. 2. 2003. P. 211–215.
23. Song W.C., Oh C.J., Jung H.B. CMOS variable gain amplifier and control method therefor. Patent US6259321B1. 2001.
24. Solomon O.M., Jr. PSD computations using Welch's method [Power Spectral Density (PSD)]. NASA STI/Recon Technical Report. 1991. doi: 10.2172/5688766
25. Evans J.R., Followill F., Hutt C.R., Kromer R.P., Nigbor R.L., Ringler A.T., Steim J.M., Wielandt E. Method for calculating self-noise spectra and operating ranges for seismographic inertial sensors and recorders // *Seismological research letters*. 2010. V. 81. N 4. P. 640–646. doi: 10.1785/gssr.81.4.640
21. Park S.M., Yoo H.J. 1.25-Gb/s regulated cascode CMOS transimpedance amplifier for gigabit ethernet applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 112–121. doi: 10.1109/JSSC.2003.820884
22. Park S.M. Gigabit CMOS transimpedance amplifiers for optical communication applications. *Proc. 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS 2003)*, vol. 2, 2003, pp. 211–215.
23. Song W.C., Oh C.J., Jung H.B. CMOS variable gain amplifier and control method therefor. *Patent US6259321 B1*, 2001.
24. Solomon O.M., Jr. *PSD computations using Welch's method [Power Spectral Density (PSD)]*. NASA STI/Recon Technical Report, 1991. doi: 10.2172/5688766
25. Evans J.R., Followill F., Hutt C.R., Kromer R.P., Nigbor R.L., Ringler A.T., Steim J.M., Wielandt E. Method for calculating self-noise spectra and operating ranges for seismographic inertial sensors and recorders. *Seismological research letters*, 2010, vol. 81, no. 4, pp. 640–646. doi: 10.1785/gssr.81.4.640

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, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

Киреевков Александр Юрьевич — кандидат технических наук, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57188592273, ORCID ID: 0000-0002-6440-5344, Alexkir49@gmail.com

Макаренко Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57207535147, ORCID ID: 0000-0003-4964-3317, a_makarenko@mail.ru

Autors

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

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

Alexander Yu. Kireenkov — PhD, Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57188592273, ORCID ID: 0000-0002-6440-5344, Alexkir49@gmail.com

Alexander A. Makarenko — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57207535147, ORCID ID: 0000-0003-4964-3317, a_makarenko@mail.ru