

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА С РЕГИСТРАЦИЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО ПОРОГОВОМУ УРОВНЮ СИГНАЛА

Т.В. Чобан

chobantv@yandex.ru

SPIN-код: 1867-4032

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описан принцип работы распределенного волоконно-оптического акустического датчика на основе интерферометра Саньяка и продемонстрирована перспективность его применения для решения задач охраны протяженных объектов. Предложена схема такого датчика на основе двух петель, созданных с использованием мультиплексирования длин волн, позволяющая реализовать сенсорную систему на основе четырех волокон кабеля, что обеспечивает компактность и упрощает ее установку вдоль охраняемого периметра. Также представлен алгоритм обработки получаемых с датчика данных, обеспечивающий высокую точность определения местоположения воздействия: по результатам лабораторных экспериментов при общей протяженности сенсорного волокна 50 км погрешность составила 13 м.

Ключевые слова

Оптическое волокно, акустический датчик, система охраны, интерферометр Саньяка, волоконно-оптический кабель, мультиплексирование по длинам волн, алгоритм опроса

Поступила в редакцию 21.07.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. На сегодняшний день распределенные волоконно-оптические датчики акустических воздействий востребованы для различных научных и практических приложений. Чувствительным элементом в таких датчиках является оптическое волокно, при акустическом воздействии на которое происходит изменение его параметров и, следовательно, изменение параметров распространяющегося по нему излучения. Благодаря явлению интерференции становится возможным зарегистрировать эти изменения, установить факт наличия воздействия и определить координату его положения вдоль сенсорного волокна в результате анализа получаемого с датчика сигнала.

Распределенные акустические датчики позволяют осуществлять удаленный мониторинг и контроль границ протяженных объектов, обеспечивать безопасность предприятий [1], трубопроводов [2], в том числе подводных [3], железнодорожных путей [4] и др. Одним из видов таких датчиков является датчик на основе распределенного интерферометра Саньяка (РИС). Подобная система характеризуется доступностью компонентной базы и простотой оптической схемы [5], что обуславливает ее невысокую стоимость и, как следствие, привлекательность для разработчиков и потенциальных пользователей. В зависимости

от общей протяженности сенсора, схемы построения и метода опроса датчик на основе РИС позволяет контролировать объекты протяженностью до 150 км [6] без усиления мощности излучения на протяжении периметра. Такие датчики обеспечивают точность от 10 м [7], причем для обработки данных не требуются значительные вычислительные ресурсы [8]. На текущем этапе развития акустических датчиков на основе РИС актуальной является задача разработки доступной в реализации схемы, а также простого метода обработки получаемых данных, которые позволят обнаруживать воздействия и определять его местоположение на протяженном периметре даже в случае высокого уровня шумов.

Принцип работы акустического датчика на основе интерферометра Саньяка. На рис. 1 приведена схема, поясняющая работу интерферометра Саньяка (ИС) в качестве датчика акустических воздействий. Интерферометр представляет собой замкнутую на выходы X-образного разветвителя петлю оптического волокна, в которой излучение непрерывного источника распространяется по ходу часовой стрелки (CW) и против хода часовой стрелки (CCW) по общему пути, и интерференционная картина регистрируется приемником излучения [9]. В случае отсутствия акустических воздействий интерференционная картина на приемниках излучения имеет некоторый устойчивый (без учета шумов) вид, обусловленный постоянным набегом фазы излучения в направлениях CW и CCW вследствие вращения Земли [10]. Эта постоянная составляющая не представляет интереса с точки зрения обнаружения акустических воздействий и может быть отфильтрована при последующей обработке.

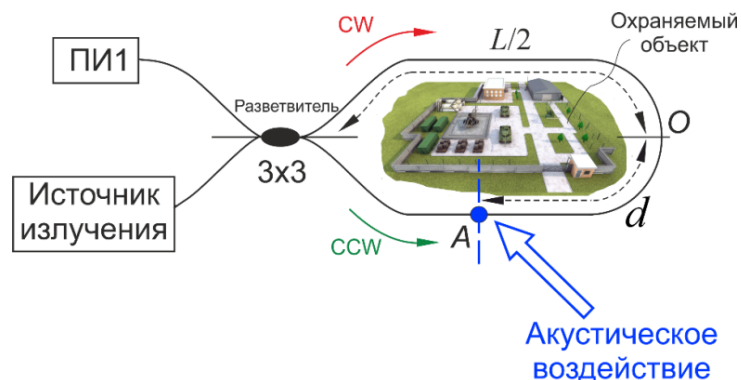


Рис. 1. Структурная схема акустического датчика на основе одной петли интерферометра Саньяка

Акустическое воздействие в некоторой точке контура вызывает локальное изменение показателя преломления n и длины L оптического волокна и, следовательно, изменяет фазу $\varphi(t)$ в этой точке, что приводит к изменению интерференционной картины, как показано на рис. 2. В сигнале, получаемом с датчика, содержится информация о координате точки воздействия, поскольку результирующая разность фаз излучения на выходе петли зависит от расстояния от начала петли до точки воздействия d [8]. Таким образом, при установке петли

интерферометра Саньяка вдоль замкнутого в кольцо контура охраняемого объекта могут быть обнаружены и локализованы нежелательные воздействия на этот периметр.

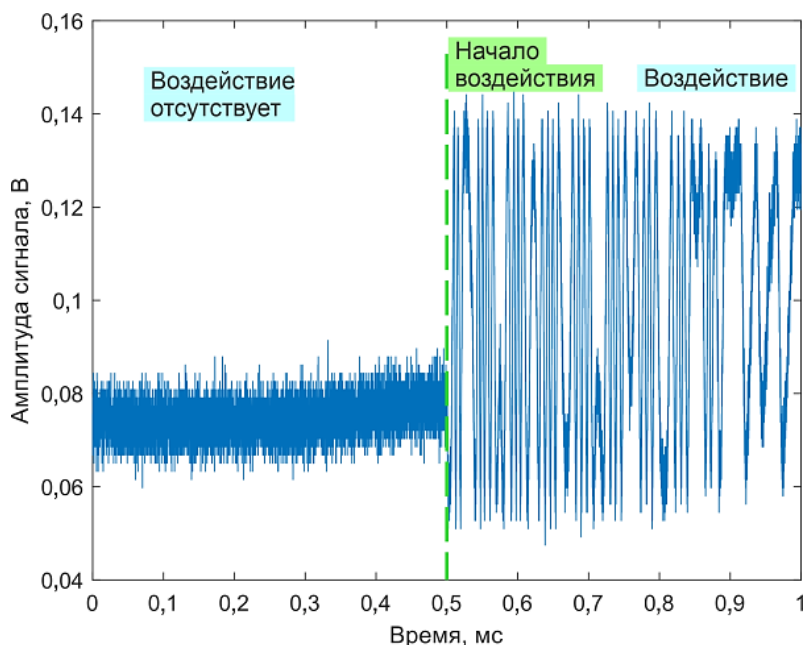


Рис. 2. Пример сигнала с датчика на основе одной петли

Описание разработанной схемы датчика на основе интерферометра Саньяка. Для обеспечения возможности определения координаты воздействия была предложена схема акустического датчика на основе РИС, показанная на рис. 3, включающая в себя две петли одинаковой длины, сформированные на основе мультиплексоров-демультиплексоров по длинам волн CWDM. Такая схема позволяет осуществлять мониторинг объектов, имеющих как замкнутый, так и незамкнутый в кольцо контур, когда при эксплуатации датчика имеется доступ только к одному из концов кабеля, в котором установлено сенсорное волокно. Пример сигнала, получаемого с датчика, построенного по предложенной схеме, приведен на рис. 4.

Принцип работы датчика с такой схемой заключается в следующем. Излучение непрерывного источника ИИ- λ_1 с длиной волны λ_1 поступает на волоконный X-образный разветвитель P1 и разделяется на две равные части. Одна из частей распространяется по ходу часовой стрелки, проходит CWDM-1, сенсорную часть по первому волокну кабеля в направлении 1-2, CWDM-2, CWDM-3, второе волокно кабеля в направлении 3-4, CWDM-4 и далее возвращается на разветвитель P1. Вторая часть излучения с длиной волны λ_1 проходит по первой петле интерферометра против хода часовой стрелки: попадает на CWDM-4, далее проходит по волокну кабеля в направлении 4-3, CWDM-3, CWDM-2, волокно кабеля в направлении 2-1, CWDM-1 и попадает снова на

разветвитель P1, где происходит интерференция между двумя частями излучения с длиной волны λ_1 . После интерференции излучение поступает на приемник излучения ПИ1.

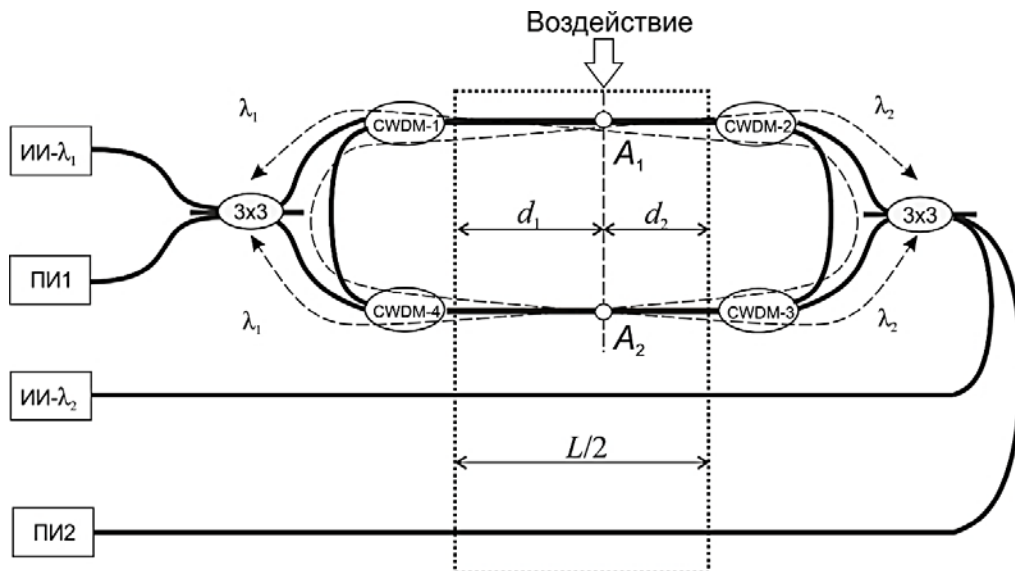


Рис. 3. Схема распределенного акустического датчика на основе ИС с мультиплексированием длин волн

Во второй петле происходит аналогично: излучение непрерывного источника излучения ИИ- λ_2 с длиной волны λ_2 поступает на разветвитель P2 и разделяется на две равные части, одна из которых распространяется по ходу часовой стрелки через CWDM-3, сенсорное волокно в направлении 3–4, CWDM-4, CWDM-1, сенсорное волокно в направлении 1–2, CWDM-2, а вторая — против хода часовой стрелки, через CWDM-2, сенсорное волокно в направлении 2–1, CWDM-1, CWDM-4, сенсорное волокно в направлении 4–3, CWDM-3, и обе части попадают на разветвитель P2, после чего результат интерференции поступает на ПИ2.

Поскольку две петли имеют общую сенсорную часть, сформированную на основе двух волокон кабеля, в результате внешнего воздействия происходит изменение фазы излучения в точках A_1 , A_2 волокон одновременно. Пусть присутствует внешнее акустическое воздействие в некоторой точке кабеля, удаленной от середины первой петли на расстояние d_1 , а от середины второй петли — на расстояние d_2 , которые в силу того, что две петли имеют одинаковую длину, связаны соотношением

$$d_1 + d_2 = L/2.$$

В результате внешнего воздействия излучение приобретает набег фазы $\varphi(t)$ и результирующая разность фаз излучения на выходе из первой и второй петель определяется выражениями

$$\Delta\varphi_1(t, \tau_{CW,1}, \tau_{CCW,1}) = \varphi(t - \tau_{CW,1}) - \varphi(t - \tau_{CCW,1}) + \frac{2\pi}{3};$$

$$\Delta\varphi_2(t, \tau_{CW,2}, \tau_{CCW,2}) = \varphi(t - \tau_{CW,2}) - \varphi(t - \tau_{CCW,2}) + \frac{2\pi}{3},$$

где $\tau_{CW,1}, \tau_{CCW,1}$ — временной промежуток, в течение которого излучение пройдет путь в направлениях CW и CCW соответственно от точки воздействия до окончания первой петли, $\tau_{CW,2}, \tau_{CCW,2}$ — аналогично для второй петли.

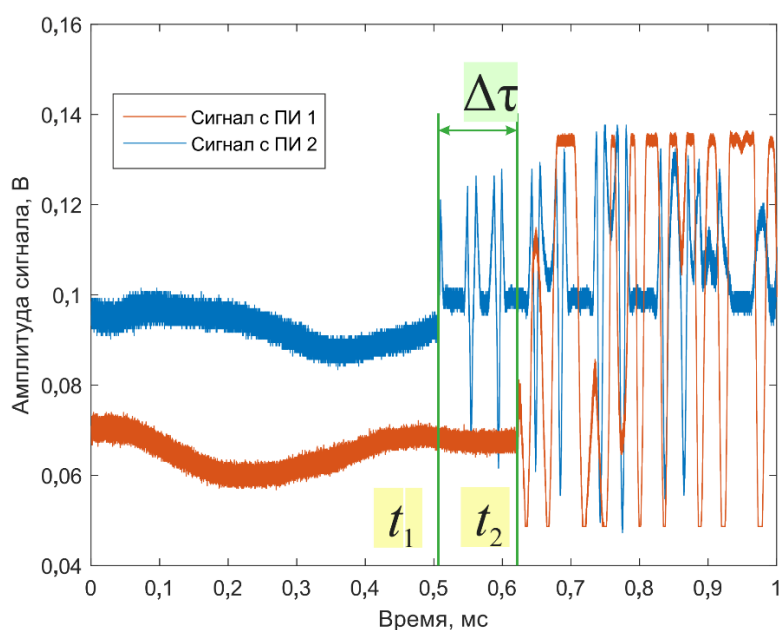


Рис. 4. Пример сигнала с датчика на основе двух петель интерферометра Саньяка

Подробное описание процесса формирования временной задержки между сигналами на выходе двух отдельных петель интерферометра Саньяка, уложенных встречно, приведено в работе [8]. В случае предложенной схемы с мультиплексированием длин волн между сигналами на выходе двух петель с общей чувствительной частью формируется аналогичная временная задержка, т. е. моменты начала изменения интерференционной картины, зарегистрированные приемниками излучения ПИ1 и ПИ2, имеют друг относительно друга временную задержку, определяемую как

$$\Delta\tau = \frac{(d_2 - d_1)n}{c},$$

где n — показатель преломления сердцевины волокна; c — скорость света.

По значению этой временной задержки может быть определена координата точки воздействия относительно начала первой петли.

$$d_1 = \frac{\Delta\tau c}{n} + \frac{L}{4}. \quad (*)$$

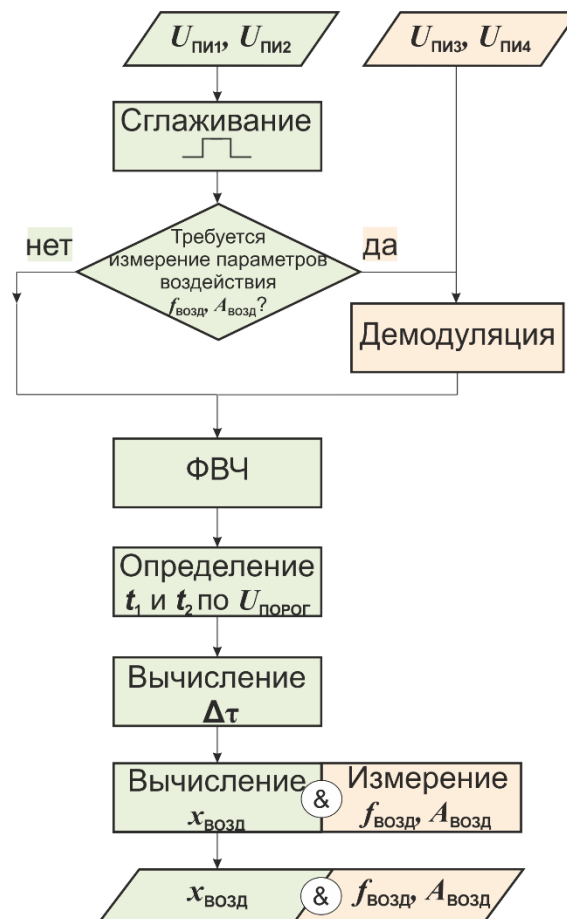


Рис. 5. Алгоритм обработки данных с датчика

Метод опроса датчика. Предложенная схема позволяет опрашивать датчик по методу поиска воздействия по пороговому значению. Суть метода заключается в определении моментов времени начала изменения интерференционной картины на выходе первой и второй петли t_1 и t_2 по установленному пороговому уровню сигнала, вычислении временной задержки $\Delta\tau$, являющейся, как показано на рис. 4, разницей этих двух значений, и вычислении координаты воздействия по формуле (*). В реальных условиях из-за влияния фотоприемника и внешней среды данные, получаемые с датчика, представляют собой смесь сигнала и шума. Для повышения точности определения координаты перед поиском воздействия реализацию целесообразно обработать усредняющим окон-

ным фильтром для уменьшения шумовых выбросов и фильтром высоких частот для исключения низкочастотной составляющей, возникающей из-за медленного изменения параметров внешней среды: температуры и давления. Алгоритм обработки получаемых с датчика данных схематично представлен на рис. 5, где $U_{\text{ПИ1,2,3,4}}$ — сигналы, получаемые с приемников ПИ1, ПИ2, ПИ3, ПИ4 соответственно; $U_{\text{порог}}$ — пороговый уровень сигнала; $f_{\text{возд}}$ — частота акустического воздействия; $A_{\text{возд}}$ — амплитуда акустического воздействия; ФВЧ — фильтр высоких частот; $t_{1,2}$ — время начала изменения интерференционной картины в первой и второй петле соответственно; $x_{\text{возд}}$ — координата воздействия.

Были проведены экспериментальные исследования точности определения координаты воздействия датчиком, построенным по предложенной схеме. Обработка данных производилась по методу регистрации воздействия по пороговому значению. Среднее квадратичное отклонение погрешности определения координаты составило 13 м, т. е. менее 0,03 % общей протяженности сенсора, что является высоким результатом для датчиков такого типа [11].

Заключение. Предложенная в работе схема распределенного акустического датчика на основе двух встречно уложенных петель интерферометров Савьяка одинаковой длины с применением мультиплексирования по длинам волн обладает такими достоинствами как доступность компонентной базы, более компактная по сравнению с ранее описанным вариантом [7], реализация на основе четырех волокон оптического кабеля, позволяющая также осуществлять мониторинг объектов с незамкнутым периметром. Описанный в работе алгоритм обработки данных, получаемых с построенного по предложенной схеме датчика, основанный на анализе временной задержки между сигналами, получаемыми с двух петель, при регистрации начала изменения интерференционной картины по пороговому уровню, позволяет производить обнаружение воздействия и вычислять его координату при наличии шумов. Работоспособность схемы подтверждена экспериментально и показано, что датчик с протяженностью сенсора 50 км обеспечивает точность определения местоположения воздействия 13 м. Такой результат делает разработанный датчик перспективным и как самостоятельную систему, и в качестве дополнения к другой системе безопасности.

Литература

- [1] Szustakowski M., Ciurapinski W., Palka N. et al. Recent development of fiber optic sensor for perimeter security. *Proc. IEEE 35th Annual 2001 Int. Carnahan Conf. on Security Technology*, 2001, pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCST.2001.962826>
- [2] Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O. et al. The sensitivity improvement characterization of distributed strain sensors due to weak fiber Bragg gratings. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 22, art. 6431. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20226431>

- [3] Huang Y., Wang Q., Shi L. et al. Underwater gas pipeline leakage source localization by distributed fiber optic sensing based on particle swarm optimization tuning of the support vector machine. *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.55.000242>
- [4] Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O. et al. Ф-OTDR based on tunable Yb-Er: phosphate glass laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1410, no. 1, art. 012108. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
- [5] Чобан Т.В., Жирнов А.А., Степанов К.В. и др. Распределенный датчик акустических воздействий на основе интерферометра Саньяка с опросом по методу "нулевых частот". *Фотон-Экспресс*, 2021, № 2, с. 14–17.
- [6] Huang J., Chen Y., Peng H. et al. A 150 km distributed fiber optic disturbance location sensor with no relay based on the dual-Sagnac interferometer employing time delay estimation. *Opt. Commun.*, 2021, vol. 479, art. 126420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126420>
- [7] Song Q., Zhou P., Peng H. et al. Improved localization algorithm for distributed fiber optic sensor based on merged Michelson-Sagnac interferometer. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 7207–7220. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.384728>
- [8] Чобан Т.В., Кошелев К.И., Хан Р.И. и др. Распределенный волоконно-оптический датчик вибрации на основе интерферометра Саньяка. *Сб. науч. тр. XXXI Межд. конф. Лазеры в науке, технике, медицине*. М., РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2020, с. 99–103.
- [9] McAulay A.D., Wang J. A Sagnac interferometer sensor system for intrusion detection and localization. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5435. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.542834>
- [10] Удд Э., ред. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М., Техносфера, 2008.
- [11] Wang Y., Yuan H., Liu X. et al. A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 85821–85837. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924736>

Чобан Татьяна Васильевна — студентка кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Карасик Валерий Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чобан Т.В. Распределенный волоконно-оптический акустический датчик на основе интерферометра саньяка с регистрацией воздействия по пороговому уровню сигнала. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 09(62). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-09-732>

DISTRIBUTED FIBER-OPTIC ACOUSTIC SENSOR BASED ON A SAGNAC INTERFEROMETER WITH DETECTION OF EXPOSURE AT THE THRESHOLD SIGNAL LEVEL

T.V. Choban

chobantv@yandex.ru
SPIN-code: 1867-4032

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The operation principle of a distributed fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer is described and the prospects of its application for solving problems of extended objects protection are demonstrated. A circuit of such a sensor based on two loops created using wavelength multiplexing is proposed, which makes it possible to implement a sensor system based on four cable fibers, which provides compactness and simplifies its installation along the protected perimeter. An algorithm for processing the data obtained from the sensor is also presented, which ensures high accuracy in determining the location of the impact: according to the results of laboratory experiments with a total length of the sensor fiber of 50 km, the error was 13 m.

Keywords

Optical fiber, acoustic sensor, security system, Sagnac interferometer, fiber optic cable, wavelength multiplexing, polling algorithm

Received 21.07.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Szustakowski M., Ciurapinski W., Palka N. et al. Recent development of fiber optic sensor for perimeter security. *Proc. IEEE 35th Annual 2001 Int. Carnahan Conf. on Security Technology*, 2001, pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCST.2001.962826>
- [2] Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O. et al. The sensitivity improvement characterization of distributed strain sensors due to weak fiber Bragg gratings. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 22, art. 6431. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20226431>
- [3] Huang Y., Wang Q., Shi L. et al. Underwater gas pipeline leakage source localization by distributed fiber optic sensing based on particle swarm optimization tuning of the support vector machine. *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.55.000242>
- [4] Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O. et al. Φ -OTDR based on tunable Yb-Er: phosphate glass laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1410, no. 1, art. 012108. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
- [5] Choban T.V., Zhirnov A.A., Stepanov K.V. et al. Distributed acoustic sensor based on Sagnac interferometer with zero frequencies poll. *Foton-Ekspres*, 2021, no. 2, pp. 14–17 (in Russ.).
- [6] Huang J., Chen Y., Peng H. et al. A 150 km distributed fiber optic disturbance location sensor with no relay based on the dual-Sagnac interferometer employing time delay estimation. *Opt. Commun.*, 2021, vol. 479, art. 126420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126420>

-
- [7] Song Q., Zhou P., Peng H. et al. Improved localization algorithm for distributed fiber optic sensor based on merged Michelson-Sagnac interferometer. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 7207–7220. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.384728>
- [8] Choban T.V., Koshelev K.I., Khan R.I. et al. [Distributed fiber optical vibration sensor based on Sagnac interferometer]. *Sb. nauch. tr. XXXI Mezhd. konf. Lazery v nauke, tekhnike, meditsine* [Proc. XXXI Int. Conf. Lasers in Science, Technics, Medicine]. Moscow, RNTORES im. A.S. Popova Publ., 2020, pp. 99–103 (in Russ.).
- [9] McAulay A.D., Wang J. A Sagnac interferometer sensor system for intrusion detection and localization. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5435. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.542834>
- [10] Udd E., ed. Fiber optic sensors. An introduction for engineers and scientists. Wiley, 2011. (Russ. ed.: Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008.)
- [11] Wang Y., Yuan H., Liu X. et. al. A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 85821–85837. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924736>

Choban T.V. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Karasik V.E., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Choban T.V. Distributed fiber-optic acoustic sensor based on a Sagnac interferometer with detection of exposure at the threshold signal level. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Polytechnical student journal], 2021, no. 09(62). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-09-732.html> (in Russ.).