

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 681.586.5

ВОЛОКОННЫЙ КОГЕРЕНТНЫЙ ФАЗОВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ¹

© 2023 г. А. Э. Алексеев^{a,*}, Б. Г. Горшков^b, В. Т. Потапов^a,
М. А. Таранов^{a,c}, Д. Е. Симикин^{a,c}

^aФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

^bИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

^cИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

^dООО «Петрофайбер»
Россия, 105082, Москва, Спартаковская пл., 14

*e-mail: aleksey.e.alekseev@gmail.com

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Предложена новая архитектура волоконного когерентного фазового рефлектометра (распределенного датчика акустических воздействий, ф-OTDR) с возможностью его применения в задачах инженерной геологии. Датчик основан на двухимпульсной схеме, в которой пара импульсов формируется с помощью несбалансированного интерферометра Майкельсона. Необходимая для осуществления демодуляции обратно-рассеянного излучения фазовая задержка формируется с помощью симметричного ответвителя 3×3 , встроенного в интерферометр. Использование несбалансированного интерферометра в схеме генерации двойных зондирующих импульсов позволяет снизить требования к степени когерентности источника излучения, так как вносимая временная задержка между двойными импульсами компенсируется в волоконном тракте рефлектометра. Это позволяет использовать в качестве источника излучения лазер с относительно широкой спектральной линией, около 1 ГГц, а также формировать короткие импульсы лазерного излучения (с длительностью 7 нс) путем прямой модуляции тока инжекции лазерного диода. Для снижения замираний сигнала в рефлектометре, а также для улучшения линейности его отклика используется усреднение откликов по 16 оптическим частотам. Работоспособность распределенного акустического датчика была продемонстрирована при детектировании сильного ударного воздействия на горизонтально закопанный в грунт кабель, а также при регистрации сейсмических волн с помощью кабеля, размещенного в скважине на дне моря.

DOI: 10.31857/S0032816223050026, EDN: ZHXJCA

ВВЕДЕНИЕ

Волоконные когерентные фазовые рефлектометры в последние годы находят все большее применение в задачах инженерной геологии, сейсмологии и геологоразведки [1–5]. Преимуществом таких датчиков является возможность использования уже существующей волоконно-оптической инфраструктуры и получения большого объема геологических данных при относительно

небольших затратах. Одним из актуальных направлений исследований в области распределенных акустических датчиков в настоящее время является дальнейшее снижение сложности их архитектуры и уменьшение их стоимости при сохранении высоких эксплуатационных характеристик, таких как хорошее пространственное разрешение, низкий уровень шума выходного сигнала и высокая степень линейности отклика [6].

Различные области применения распределенных акустических датчиков выдвигают различные требования к их эксплуатационным характеристикам. Задачи инженерной геологии требуют обеспечить высокое пространственное разре-

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

ние, обычно менее 1 м, и высокую частоту дискретизации сигнала внешнего воздействия, порядка нескольких килогерц. Общая протяженность чувствительного волокна при этом обычно не превышает нескольких километров. В сейсмологических задачах требуются высокая чувствительность и низкий уровень шума на субгерцевых частотах, при этом пространственное разрешение может составлять десятки и сотни метров при полной протяженности волоконного тракта, составляющей десятки километров [3]. В предыдущей работе был предложен распределенный датчик акустических воздействий со стабилизацией частоты лазерного источника излучения и с низким уровнем шумов выходного сигнала для сейсмологических применений [7]. В настоящей работе предложена новая архитектура когерентного фазового рефлектометра, специализированная для применений в инженерной геологии, с пространственным разрешением 1–2 м, с высокой степенью линейности отклика, достигаемого путем усреднения по различным частотам зондирующих импульсов.

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ КОГЕРЕНТНЫХ ФАЗОВЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Коммерческие образцы когерентных фазовых рефлектометров, как правило, основаны на нескольких базовых архитектурах [8]. В основе одной из них лежит использование одинарного зондирующего импульса и оптического гибрида, как правило, в виде симметричного ответвителя 3×3 , помещенного в несбалансированный интерферометр Маха–Цандера или Майкельсона на приемной стороне рефлектометра [9, 10]. Сигнал на выходе интерферометра принимается далее с помощью трех и более фотодетекторов.

В основе другой архитектуры лежит использование двойного зондирующего импульса с фазовым или частотным разнесением его составляющих для осуществления демодуляции обратно-рассеянного излучения [11–13]. Двойной импульс обычно генерируется из непрерывного лазерного излучения с помощью модулятора интенсивности, в качестве которого обычно выступает акустооптический модулятор (acousto-optic modulator, AOM), необходимое разнесение может быть реализовано с помощью фазового модулятора или непосредственно с помощью AOM [14].

Еще одной часто используемой архитектурой когерентного фазового рефлектометра является схема, в которой реализован гетеродинный метод приема обратно-рассеянного излучения [15, 16].

В первой и во второй схемах рефлектометров реализуется интерференция сигналов, рассеянных разными рассеивающими участками чувствительного волокна. Дальнейшая процедура демоду-

ляции позволяет восстановить сигнал внешнего воздействия на участок волокна, разделяющий эти два рассеивающих участка, и получить так называемый отклик рефлектометра. Участок, разделяющий рассеивающие участки, называется длиной измерительной базы рефлектометра (gauge length) [8].

Схема когерентного рефлектометра, в которой двойной зондирующий импульс формируется с помощью модулятора интенсивности, имеет более высокий уровень шумов в выходном сигнале, чем схема с одинарным зондирующим импульсом и несбалансированным интерферометром. Это связано с тем, что в схеме с несбалансированным интерферометром временная задержка между полями, рассеянными различными участками оптического волокна, компенсируется линией задержки в интерферометре. Кроме этого, влияние частотного дрейфа в схеме с двойным импульсом выше, чем в схеме с одинарным импульсом [7].

Схема с двойным зондирующим импульсом обладает, однако, тем преимуществом, что полная энергия оптического излучения, поступающая в оптическое волокно, может быть в два раза выше энергии в случае одинарного зондирующего импульса, которая ограничена возникновением нелинейных эффектов в оптическом волокне, в частности, модуляционной неустойчивостью. Таким образом, мощность сигнала обратно-рассеянного излучения в схеме с двойным зондирующим импульсом может быть выше, чем в схеме с одинарным зондирующим импульсом, что приводит к увеличению оптического соотношения сигнал/шум.

В настоящей работе предлагается новая схема распределенного акустического датчика, в которой двойной зондирующий импульс формируется с помощью несбалансированного интерферометра Майкельсона. Демодуляция в прилагаемом датчике выполняется методом фазового разнесения, при этом необходимые для осуществления демодуляции фазовые соотношения между составляющими зондирующего импульса формируются с помощью ответвителя 3×3 , который является составной частью интерферометра Майкельсона [17].

СХЕМА КОГЕРЕНТНОГО ФАЗОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

Схема предлагаемого когерентного фазового рефлектометра приведена на рис. 1. Импульсы излучения с длительностью несколько наносекунд генерируются методом прямой модуляции тока инжекции лазера. После усиления с помощью эрбиевого волоконного усилителя (erbium-doped fiber amplifier EDFA) импульс поступает в несбалансированный интерферометр Майкель-

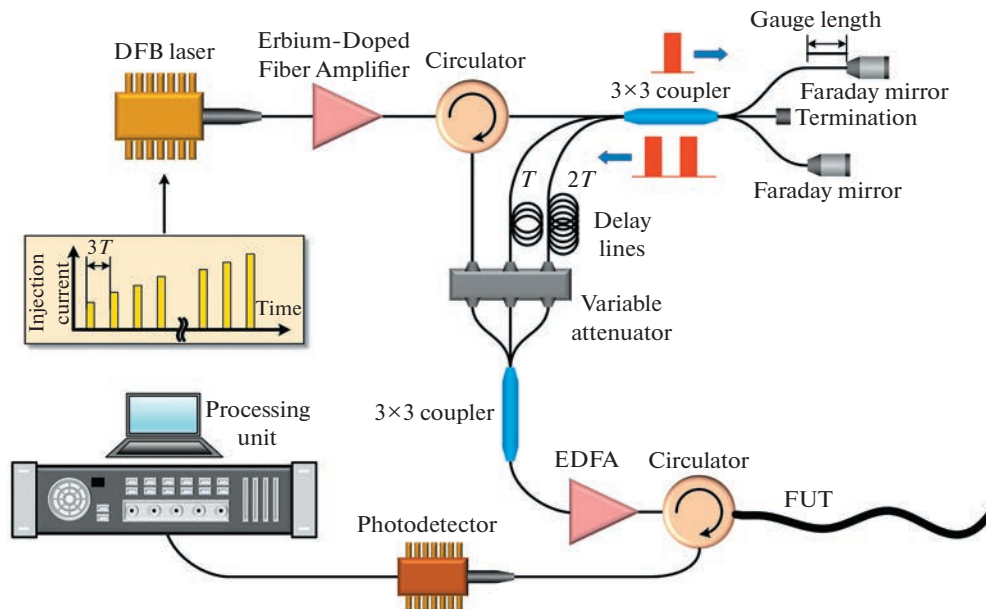


Рис. 1. Принципиальная схема когерентного фазового рефлектометра.

сона, линия задержки которого определяет длину измерительной базы рефлектометра. Три пары зондирующих импульсов формируются с помощью интерферометра и выходят из трех портов симметричного ответвителя 3×3 . Свойством этого ответвителя является то, что относительная фазовая задержка между полями, выходящими с разных его портов, равна $2\pi/3$. Таким образом, на выходных портах ответвителя формируются двойные зондирующие импульсы с относительными фазовыми задержками между его составляющими, равными $0, +2\pi/3 -2\pi/3$. Для согласования состояний поляризации составляющих двойного зондирующего импульса в интерферометре Майкельсона используются зеркала Фарадея.

Двойные импульсы, выходящие из портов ответвителя, проходят дополнительную задержку, так чтобы каждый следующий двойной импульс поступал в чувствительное волокно не раньше, чем рассеянное излучение от предыдущего импульса полностью покинет его. Время прохода излучения до конца волокна и обратно обозначено буквой T на рис. 1. Перед тем как попасть в волокно, мощности импульсов выравниваются с помощью переменного аттенюатора и усиливаются оптическим усилителем. Таким образом, по аналогии с предыдущей работой [12] в волокно вводятся последовательно три двойных зондирующих импульса с относительными фазовыми задержками между их частями, равными $0, +2\pi/3 -2\pi/3$. Обратное-рассеянное излучение детектируется с помощью лавинного фотодиода и демоду-

лируется с использованием фильтра Калмана [18].

Одной из особенностей когерентного фазового рефлектометра, в котором обратное-рассеянные поля формируются протяженными рассеивающими участками, является нелинейность его отклика по отношению к внешнему воздействию [15, 19–22]. В общем виде отклик когерентного фазового рефлектометра содержит в себе как линейную, так и нелинейную составляющие по отношению к внешнему воздействию. Линейная составляющая отклика связана с изменением фазы обратное-рассеянного поля на длине измерительной базы рефлектометра, нелинейная составляющая формируется самими рассеивающими участками при воздействии на них. Нелинейный по отношению к внешнему воздействию отклик рассеивающего участка меняется случайным образом при изменении статистического распределения рассеивающих центров в нем.

Существуют два основных подхода к снижению нелинейных искажений в отклике рефлектометра. В основе первого из них лежит увеличение отношения длины измерительной базы и протяженности рассеивающих участков [15]. Этот подход приводит, однако, к снижению разрешения датчика или к снижению оптического отношения сигнал/шум обратное-рассеянного излучения. Вторым подходом к линейаризации отклика рефлектометра является его усреднение по независимым реализациям, полученным, например, на разных частотах зондирующих импульсов [23, 24]. Необходимым при этом условием является статистическая некоррелированность откликов ре-

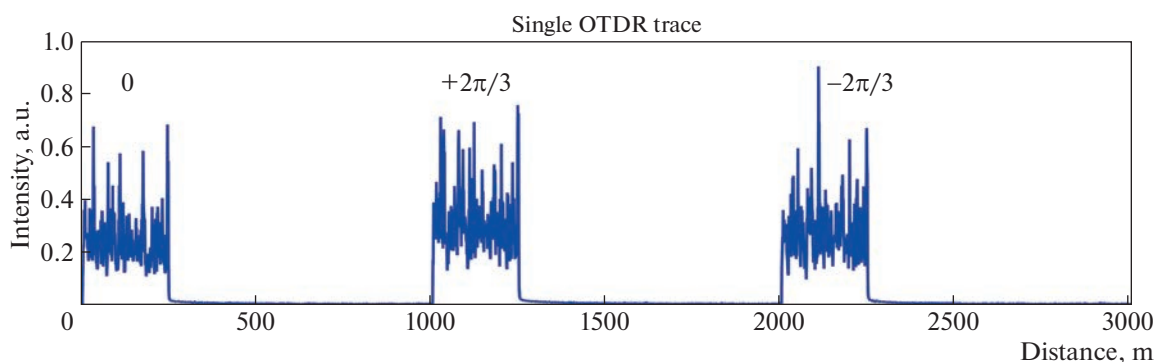


Рис. 2. Типичная рефлектограмма когерентного фазового рефлектометра.

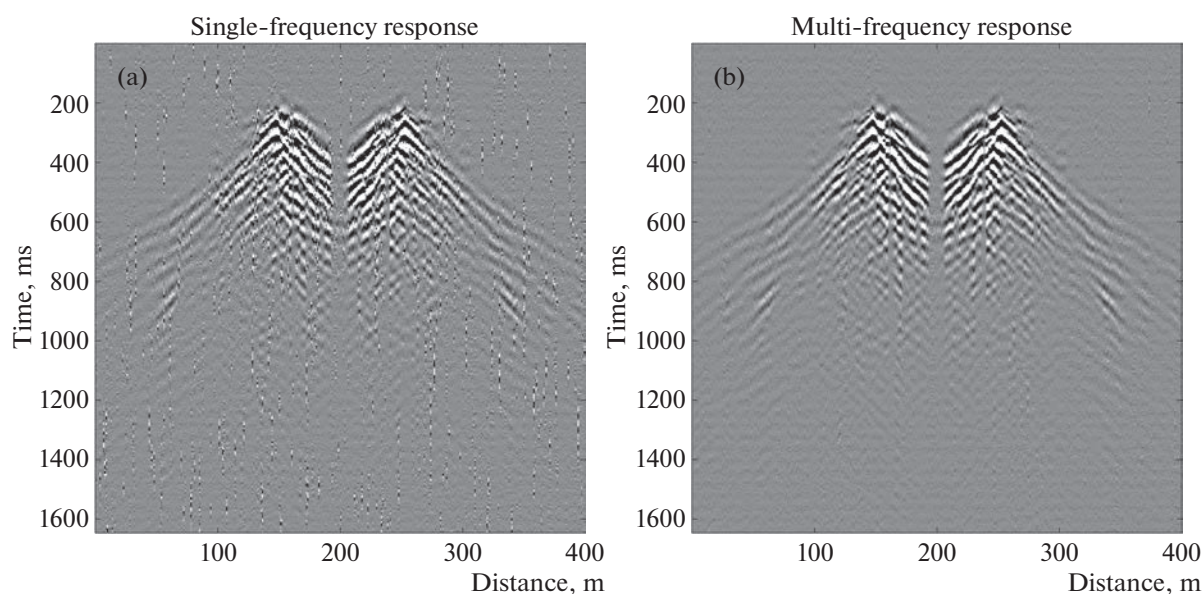


Рис. 3. Отклик когерентного фазового рефлектометра на ударное воздействие на грунт при регистрации с помощью зондирующего импульса на одной частоте (а) и при усреднении по 16 частотам зондирующих импульсов (б). Градации серого обозначают амплитуду сейсмических волн в произвольных единицах.

флектметра на разных частотах, которая достигается при условии достаточной разницы этих частот [25]. Данный подход к усреднению реализован в предлагаемой схеме рефлектометра, при этом зондирующие импульсы на 16 различных частотах также формируются путем прямой модуляции тока инжекции полупроводникового лазера.

К недостатку предлагаемой схемы когерентного фазового рефлектометра можно отнести требования к температурной и вибрационной изоляции несбалансированного интерферометра, что приводит к необходимости использовать для него специальный изолирующий корпус. Кроме того, максимальная длина тестируемого волокна ограничена заранее параметрами задержки зондирующих импульсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Типичная рефлектограмма когерентного фазового рефлектометра, изображенного на рис. 1, показана на рис. 2. Полная рефлектограмма состоит из трех последовательных рефлектограмм, отражающих три последовательные посылки зондирующих импульсов.

Работоспособность предлагаемой схемы рефлектометра продемонстрирована в двух экспериментах. Первый эксперимент состоял в регистрации поверхностных волн, формируемых путем ударного воздействия груза с массой 200 кг при его падении на грунт, с помощью волоконного кабеля, закопанного возле места падения на глубину 50 см. В качестве источника излучения использовался лазерный диод с относительно

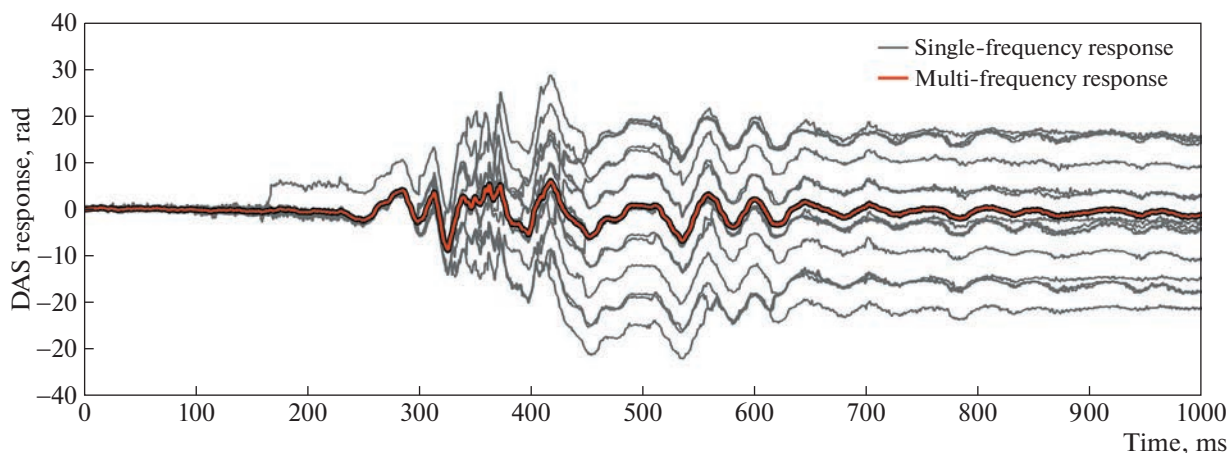


Рис. 4. Отклики когерентного фазового рефлектометра, полученные на различных частотах зондирующих импульсов, в которых видны фазовые скачки, а также усредненный отклик, где фазовые скачки отсутствуют.

большой шириной спектральной линии (около 1 ГГц). Длительности импульсов зондирующего излучения, составляющих двойной импульс, были равны 7 нс, длина измерительной базы рефлектометра составляла 1 м, частота сбора данных на 16 оптических частотах составляла 2 кГц. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

На рис. 3 видно, что отклик имеет удовлетворительный вид даже при регистрации на одной частоте зондирующего импульса, хотя в нем присутствуют фазовые скачки, вызванные замиранием сигнала. Усреднение по 16 частотам улучшает отношение сигнал/шум и устраняет фазовые скачки [22]. Результат устранения фазовых скачков при усреднении показан на рис. 4.

Второй эксперимент состоял в проведении с помощью предложенного когерентного фазового рефлектометра продольного вертикального сейсмического профилирования (ВСП) в море Лаптевых, подробное описание эксперимента можно найти в работе [26]. С бурового судна в морском дне была пробурена скважина глубиной 130 м. В буровую колонну свободно опускался волоконно-оптический кабель. На глубине 1 м от поверхности воды располагался электроискровой источник “спаркер” с центральной частотой 260 Гц. Источник возбуждал гидроволны 1 раз в секунду в течение 1 ч, эти гидроволны, в свою очередь, возбуждали сейсмические волны в грунте, регистрируемые оптическим волокном рефлектометра.

В данном эксперименте в качестве источника излучения в когерентном рефлектометре использовался полупроводниковый лазер с внешним резонатором с шириной спектральной линии излучения, равной 100 кГц. Применение лазера с малой шириной спектральной линии позволило снизить уровень шума выходного сигнала и регистрировать очень малые изменения обратно-рас-

сеянного поля, вызванные слабым внешним воздействием. Импульсы оптического излучения, составляющие двойной импульс, имели длительность, равную 7 нс, длина измерительной базы рефлектометра составляла 2 м. При регистрации данных использовались зондирующие импульсы на одной частоте, это позволило поднять частоту

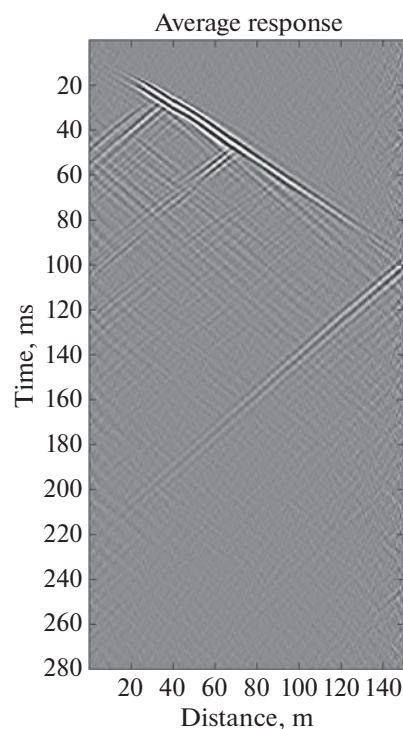


Рис. 5. Результат продольного вертикального сейсмического профилирования, полученный с использованием предлагаемого когерентного фазового рефлектометра с усреднением по 3600 реализациям и дополнительной фильтрацией с помощью f-k-фильтра.

опроса волокна в скважине до 30 кГц. При этом вместо усреднения по различным частотам зондирующих импульсов проводилось усреднение по различным реализациям внешних воздействий, число которых за 1 ч составляло 3600. Результат усреднения откликов когерентного фазового рефлектометра по 3600 воздействиям, дополнительно обработанный с помощью f-k-фильтра для удаления гидроакустических волн, показан на рис. 5. Качество полученных данных является достаточным для использования их в дальнейшей обработке и получения геологической модели среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая схема когерентного фазового рефлектометра с двойным зондирующим импульсом, который формируется с помощью несбалансированного интерферометра Майкельсона. Необходимые для демодуляции соотношения фаз полей, составляющих двойной зондирующий импульс, были получены с помощью симметричного ответвителя 3х3, входящего в состав несбалансированного интерферометра. Такая схема генерации двойного импульса позволила снизить требования к степени когерентности источника излучения и использовать лазерный диод с относительно большой шириной спектральной линии (около 1 ГГц). Для линейаризации отклика рефлектометра и устранения замираний сигнала было реализовано усреднение по 16 оптическим частотам зондирующих импульсов.

Для подтверждения работоспособности предлагаемого распределенного акустического датчика были проведены два эксперимента. В первом из них проведена регистрация ударного воздействия на грунт с помощью волоконного кабеля, закопанного в горизонтальном направлении. Во втором эксперименте когерентный фазовый рефлектометр был использован для проведения продольного вертикального сейсмического профилирования в скважине на дне моря. Успешно проведенные эксперименты демонстрируют работоспособность предложенного распределенного акустического датчика и возможность его применения в различных задачах. Простота конструкции и относительно недорогая элементная база датчика позволяют рассчитывать на его широкое использование в задачах инженерной геологии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена частично в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mateeva A., Lopez J., Potters H., Mestayer J., Cox B., Ki-yashchenko D., Wills P., Grandi S., Hornman K., Ku-vshinov B., Berlang W., Yang Zh., Detomo R.* // *Geophys. Prospect.* 2014. V. 62. P. 679. <https://www.earthdoc.org/content/journals/10.1111/1365-2478.12116>
2. *Fernández-Ruiz M.R., Soto M.A., Williams E.F., Martín-Lopez S., Zhan Z., González-Herreraez M., Martins H.F.* // *APL Photon.* 2020. V. 5. P. 030901. <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5139602>
3. *Williams E.F., Fernández-Ruiz M.R., Magalhaes R., Vant-hillo R., Zhan Z., González-Herreraez M., Martins H.F.* // *Nature commun.* 2019. V. 10. P. 1. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13262-7>
4. *Bakulin A., Silvestrov I., Pevzner R.* // *The Leading Edge.* 2020. V. 39. P. 808. <https://doi.org/10.1190/tle39110808.1>
5. *Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Konstantin V.S., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A.* // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 1033. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1033/htm>
6. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T.* // *Laser Phys.* 2019. V. 29. P. 055106. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/ab0d15>
7. *Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Taranov M.A., Simikin D.E., Potapov V.T., Ilinskiy D.A.* // *Appl. Opt.* 2022. V. 61. P. 8308. <https://doi.org/10.1364/AO.468804>
8. *Hartog A.H.* An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC press. 2017.
9. *Posey R.Jr, Johnson G.A., Vohra S.T.* // *Electron. Lett.* 2000. V. 36. P. 1688. https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_20001200
10. *Masoudi A., Belal M., Newson T.P.* // *Measurement. Sci. Technol.* 2013. V. 24. P. 085204. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/24/8/085204/>
11. *Dakin J.P., Lamb C.* UK Patent GB2222247A. 1990. <https://patents.google.com/patent/GB2222247A/en>
12. *Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E.* // *Laser Phys.* 2014. V. 24. 115106. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1054-660X/24/11/115106>
13. *Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E.* // *Laser Phys.* 2015. V. 25. P. 065101. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1054-660X/25/6/065101/>
14. *Nikitin S.P., Kuzmenkov A.I., Gorbulyenko V.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N.* // *Laser Phys.* 2018. V. 28. 085107. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/aac714/meta>
15. *Hartog A., Kader K.* Distributed fiber optic sensor system with improved linearity, US Patent No. 9.170.149. 2015. <https://patents.google.com/patent/US9170149B2/en>
16. *Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X.* (2010). // *J. Lightwave Technol.* 2010. V. 28. P. 3243. <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-28-22-3243>
17. *Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Simikin D.E., Taranov M.A., Zhukov K.M., Potapov V.T.* *Sensors.* 2022. V. 22.

- P. 9482.
<https://doi.org/10.3390/s22239482>
18. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Bashaev A.V., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E.* // *Laser Phys.* 2021. V. 31. P. 035101.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/abd936/meta>
 19. *Hartog A.H., Kotov O.I., Liokumovich L.B.* In: *Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013 – Current and Future Trends*. European Association of Geoscientists & Engineers. 2013 (July). P. 351.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131301>
 20. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T.* // *Laser Phys.* 2019. V. 29. P. 055106.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/ab0d15/meta>
 21. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E.* // *Laser Phys.* 2020. V. 30. P. 035107.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/ab70b0/meta>
 22. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E.* // *Appl. Opt.* 2022. V. 61. P. 231.
<https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-61-1-231>
 23. *Hartog A.H., Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Dean T., Cuny T., Constantinou A., Englich F.V.* // *Geophys. Prospect.* 2018. V. 66. P. 192.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.12612>
 24. *Ogden H.M., Murray M.J., Murray J.B., Kirkendall C., Redding B.* // *Scien. Rep.* 2021. V. 11. P. 1.
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-97647-z>
 25. *Mermelstein M.D., Posey R., Johnson G.A., Vohra S.T.* // *Opt. Lett.* 2001. V. 26. P. 58.
<https://doi.org/10.1364/OL.26.000058>
 26. *Судакова М.С., Белов М.В., Понимаскин А.О., Пирогова А.С., Токарев М.Ю., Колюбакин А.А.* // *Геофизика* 2021. Т. 6. С. 111.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=47926026>