

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 681.586.5

ВОЛОКОННЫЙ ФАЗОВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЙСМОЛОГИИ¹

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

^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.

Предложен волоконный когерентный фазовый рефлектометр (распределенный датчик акустических воздействий, ф-OTDR) с низким уровнем шума выходного сигнала в диапазоне частот от 0.01 до 1 Гц для сейсмологических применений. Архитектура датчика основана на использовании несбалансированного (неравноплечего) интерферометра Маха–Цендера, который применяется для формирования двойных зондирующих импульсов с требуемыми фазовыми соотношениями его составляющих, а также используется в схеме обратной связи для стабилизации частоты источника лазерного излучения. Низкий уровень шума выходного сигнала в предложенной схеме достигается за счет компенсации разности оптических путей полей двойного зондирующего импульса, рассеянных разными участками оптического волокна. Применимость предложенной схемы экспериментально продемонстрирована при регистрации удаленного землетрясения с помощью оптоволоконного кабеля, размещенного на дне Черного моря.

DOI: 10.31857/S0032816223050014, EDN: ZHMNRT

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы волоконные когерентные рефлектометры все в большей степени находят применение в задачах геологоразведки [1] и сейсмологии [2]. При этом требования к характеристикам таких датчиков могут различаться существенным образом в зависимости от специфики конкретной задачи. Так, например, в задачах вертикального сейсмического профилирования (ВСП) от распределенного датчика требуется обеспечить высокое пространственное разрешение, как правило, лучше 1 м, а также относительно высокую частоту дискретизации сигнала внешнего воздействия, порядка нескольких килогерц, при этом длина чувствительного волокна может быть относи-

тельно невысокой, менее 10 км. В задачах обнаружения сейсмической активности требуется высокая чувствительность датчика на субгерцевых частотах, при этом пространственное разрешение может составлять десятки и сотни метров при полной длине волоконного кабеля, составляющей 40 км и более [2]. В настоящей работе предлагается распределенный датчик акустических воздействий, адаптированный для применения в сейсмологии с низким уровнем шума в диапазоне субгерцевых частот, с источником лазерного излучения, стабилизированным по частоте.

ОДНОИМПУЛЬСНАЯ И ДВУХИМПУЛЬСНАЯ СХЕМЫ КОГЕРЕНТНЫХ ФАЗОВЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

При создании волоконных когерентных фазовых рефлектометров для восстановления сигнала

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).

внешнего воздействия часто используются две базовые схемы. В основе одной из них лежит использование одинарного зондирующего импульса и дополнительной линии задержки, обычно организованной с помощью несбалансированного интерферометра Майкельсона или Маха—Цендера на приемной стороне прибора [3–5]. В основе другой схемы лежит использование двойного зондирующего импульса, формируемого с помощью модулятора интенсивности на передающей стороне прибора [6–9], в качестве которого могут использоваться акустооптический модулятор, электрооптический модулятор или полупроводниковый оптический усилитель. Общей особенностью этих двух схем когерентных рефлектометров является то, что они позволяют получить интерференцию полей, рассеянных участками волокна, разделенными в пространстве некоторым расстоянием, которое принято называть длиной измерительной базы (gauge length) [10]. Полученный интерференционный сигнал содержит информацию о внешнем воздействии на область между рассеивающими участками, которую можно восстановить, используя различные процедуры демодуляции [11], и получить так называемый отклик когерентного рефлектометра. Существенным различием этих двух схем является то, что в первом случае интерферирующие поля, рассеянные разными участками волокна, образованы от одного исходного оптического импульса, а во втором случае эти поля образованы от двух различных импульсов, составляющих исходный двойной импульс. Таким образом, в схеме с двойным зондирующим импульсом временная задержка между интерферирующими полями всегда присутствует, в результате интерференционный сигнал в этой схеме, а также отклик рефлектометра обладают более высоким уровнем шума, вызванным флуктуациями фазы лазерного источника, по сравнению со схемой с линией задержки [12]. Кроме этого, нескомпенсированная задержка в схеме с двойным зондирующим импульсом в случае нестабильности частоты лазерного источника излучения приводит к дополнительному паразитному отклику когерентного рефлектометра на низких частотах. 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.

Еще одной широко распространенной схемой распределенного волоконного акустического датчика является схема, в которой реализован гетеродинный метод приема обратно-рассеянного импульсного излучения [13, 14]. В этой схеме непрерывное поле опорного излучения интерферирует с обратно-рассеянным полем, приходящим на приемник в разные моменты времени. Соответствующая временная задержка для поля опорного излучения также не компенсируется в данной схеме.

Схема когерентного фазового рефлектометра, предложенная в настоящей работе, использует двойной зондирующий импульс, который генерируется из исходного одинарного с помощью несбалансированного интерферометра Маха—Цандера. Кроме того, в схеме организована стабилизация частоты лазерного источника с использованием того же интерферометра. В совокупности это позволяет снизить влияние фазового шума лазерного источника излучения, а также влияние дрейфа его частоты на отклик рефлектометра [15].

СХЕМА КОГЕРЕНТНОГО ФАЗОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

Схема предлагаемого волоконного когерентного фазового рефлектометра представлена на рис. 1. Данная схема была предложена впервые в патенте [16].

В качестве источника когерентного лазерного излучения в когерентном фазовом рефлектометре выступал полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (DFB) с длиной волны в диапазоне 1550 нм и шириной спектральной линии на полувысоте (full width at half maximum (FWHM)), составляющей 2.5 кГц. Излучение лазера поступало в акустооптический модулятор (АОМ) через ответвитель CPL_1 с коэффициентом ответвления 95%, который формировал оптические импульсы с длительностью 50 нс. Далее импульсы поступали через циркулятор CIR_1 (из порта 1 в порт 2) в неравноплечий интерферометр Маха—Цендера (Mach—Zehnder interferometer MZI). Сам интерферометр был образован двумя ответвителями CPL_2 и CPL_3 с коэффициентами ответвления 50% и двумя волокнами разной длины, при этом длина большего плеча составляла 40 м, длина меньшего плеча составляла 4 м. В коротком плече был установлен контроллер состояния поляризации (PC) для согласования состояний поляризации излучений, проходящих через интерферометр. Таким образом, разность длин плеч интерферометра составляла 36 м.

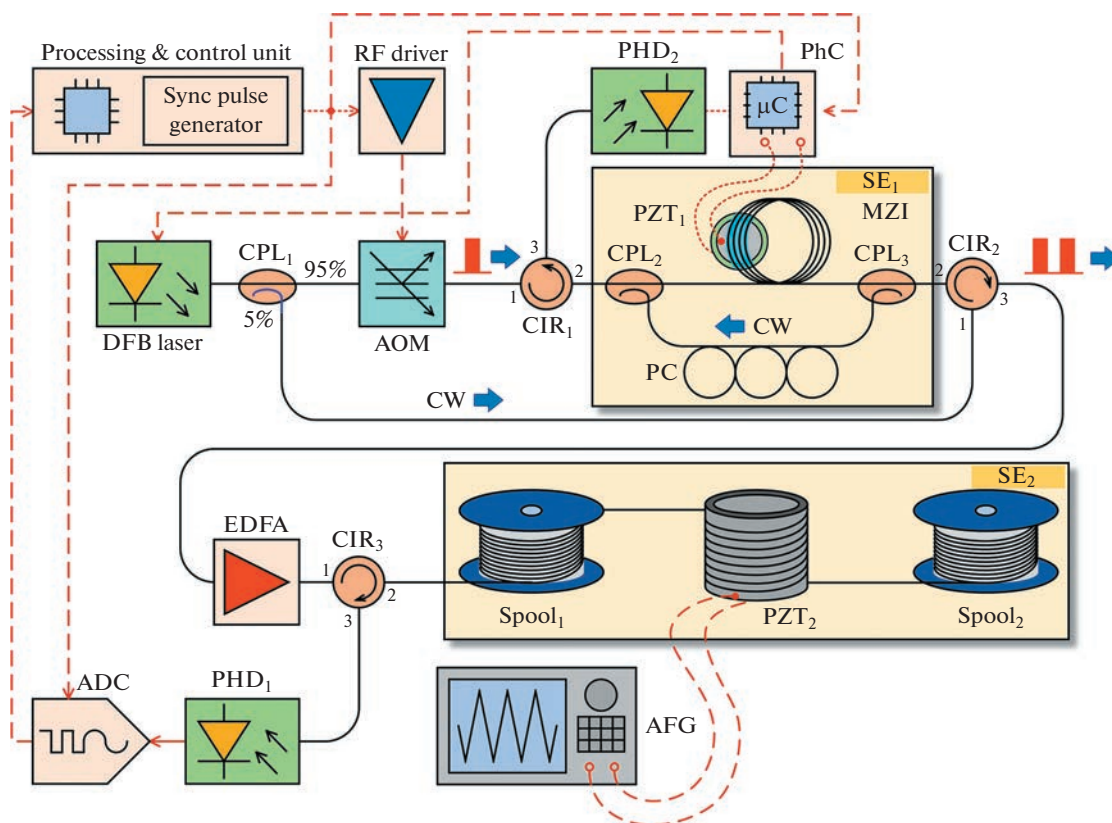


Рис. 1. Схема когерентного фазового рефлектометра с системой стабилизации частоты лазерного источника (ADC – analog to digital converter, аналого-цифровой преобразователь; AFG – arbitrary function generator, генератор сигналов; AOM – acousto-optic modulator, акустооптический модулятор; CIR – circulator, циркулятор; CPL – coupler, ответвитель; CW – continuous-wave light, непрерывное излучение; DFB laser – distributed feedback laser, лазер с распределенной обратной связью; EDFA – erbium-doped fiber amplifier волоконный усилитель, легированный эрбием; FUT – fiber under test, тестируемое волокно; MZI – Mach-Zehnder interferometer, интерферометр Маха–Цендера; PC – polarization controller, контроллер состояния поляризации; PhC – phase controller, контроллер фазы оптического сигнала; PHD – photodetector, фотодетектор; PZT – piezoelectric transducer, пьезоэлектрический преобразователь; RF driver – radiofrequency driver, радиочастотный драйвер; SE – sealed enclosure, изолированный корпус; μC – microcontroller, микроконтроллер). Штриховые линии отображают электрические сигналы и соединения.

Волокно длинного плеча интерферометра было частично приклеено к пьезоэлектрическому преобразователю PZT_1 , представляющему собой диск из цирконата-титаната свинца с толщиной 0.1 мм и диаметром 15 мм. Одиночный зондирующий импульс, поступающий в интерферометр, преобразовывался в двойной импульс, который затем после прохождения циркулятора CIR_2 (из порта 2 в порт 3) усиливался с помощью эрбиевого волоконного усилителя (EDFA). Усиленный сигнал поступал далее в оптическое волокно (FUT) через циркулятор CIR_3 (из порта 1 в порт 2). Обратнорассеянное излучение через тот же циркулятор CIR_3 (из порта 2 в порт 3) направлялось на фотоприемник PHD_1 с шириной полосы пропускания, равной 11 МГц. Выходной сигнал фотоприемника оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (ADC) с частотой дискретизации, равной 80 Мс/с. Результат

оцифровки поступал в блок обработки и контроля (processing & control unit), который проводил восстановление сигнала внешнего воздействия на волокно, а также осуществлял синхронную работу элементов схемы: аналого-цифрового преобразователя (ADC), акустооптического модулятора (AOM), а также контроллера фазы оптического сигнала (PhC). Контроллер фазы оптического сигнала (PhC) использовался для управления пьезоэлектрическим преобразователем PZT_1 , который производил модуляцию оптической равности плеч интерферометра Маха–Цендера, что в результате приводило к модуляции разности фаз полей, составляющих двойной зондирующий импульс на выходе интерферометра.

Управление пьезоэлектрическим преобразователем PZT_1 проводилось таким образом, что на выходе интерферометра Маха–Цендера образовывались три последовательные группы зондиру-

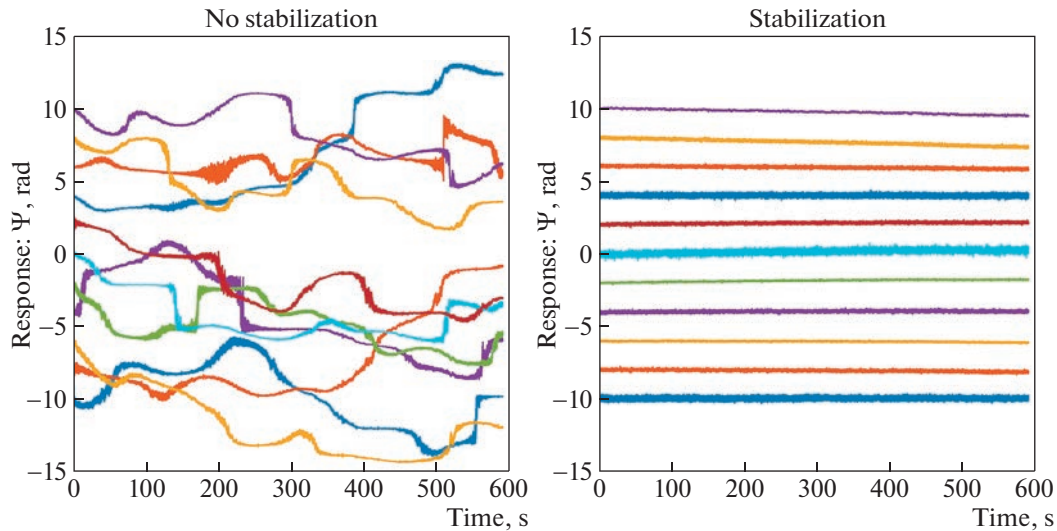


Рис. 2. Отклики 11 пространственных каналов когерентного фазового рефлектометра без стабилизации частоты (слева) лазерного источника и со стабилизацией его частоты (справа).

ющих импульсов с относительными фазовыми задержками между его составляющими, равными 0, $+2\pi/3$ $-2\pi/3$ [8]. Такие фазовые соотношения позволяли провести квадратурную демодуляцию интерференционного сигнала с применением фильтра Калмана [11].

Примерно 5% мощности непрерывного излучения, генерируемого лазерным источником (DFB), поступало в интерферометр Маха—Цендера через ответвитель CPL₁ и циркулятор CIR₂ (из порта 1 в порт 2). Таким образом, непрерывное излучение проходило интерферометр MZI в направлении, обратном направлению распространения зондирующего импульса. Поля, прошедшие интерферометр по двум путям, объединялись в ответвителе CPL₂ и с помощью циркулятора CIR₁ (из порта 2 в порт 3) направлялись на фотоприемник PND₂ с шириной полосы пропускания, равной 100 кГц. Далее интерференционный сигнал оцифровывался и обрабатывался с помощью контроллера фазы оптического сигнала PhC. Модуляция разности оптических путей интерферометра Маха—Цендера с помощью контроллера фазы оптического сигнала позволяла провести измерение смещения частоты лазерного источника, вызванного ее случайным дрейфом. В случае смещения частоты источника контроллер генерировал корректирующий сигнал, подаваемый на источник излучения, возвращающий его частоту к ее первоначальному значению.

В силу того, что интерферометр Маха—Цендера восприимчив к внешним температурным и вибрационным возмущениям, он был размещен в специальном изолированном корпусе, обеспечи-

вающим достаточную тепловую и механическую изоляцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные данные, демонстрирующие работу схемы стабилизации частоты лазерного источника, показаны на рис. 2, на котором отображены отклики 11 пространственных каналов когерентного фазового рефлектометра в радианах, записанные в течение 10 мин без стабилизации частоты источника и со стабилизацией его частоты. Без стабилизации частоты наблюдается субгерцевый случайный дрейф откликов, рис. 2 (левая часть), стабилизация частоты существенным образом снижает низкочастотный дрейф откликов, рис. 2 (правая часть).

Усредненная по 11 пространственным каналам амплитудная спектральная плотность откликов, приведенных на рис. 2 (отклики измерены в единицах натяжения волокна), показана на рис. 3 без стабилизации частоты и со стабилизацией частоты.

На рис. 3 видно, что в области субгерцевых частот стабилизация частоты лазерного источника существенным образом снижает уровень шума, который на частоте 0.01 Гц достигает значения $0.6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Рассмотренный выше когерентный фазовый рефлектометр был установлен в г. Геленджике, чувствительное волокно длиной 10 км было проложено по дну Черного моря на глубине от 10 до 150 м. Пространственное разрешение датчика составляло 18 м, частота опроса была равна 3 кГц. 14 ноября 2021 года в 12 ч 07 мин гринвичского времени (15 ч 07 мин московского времени) на

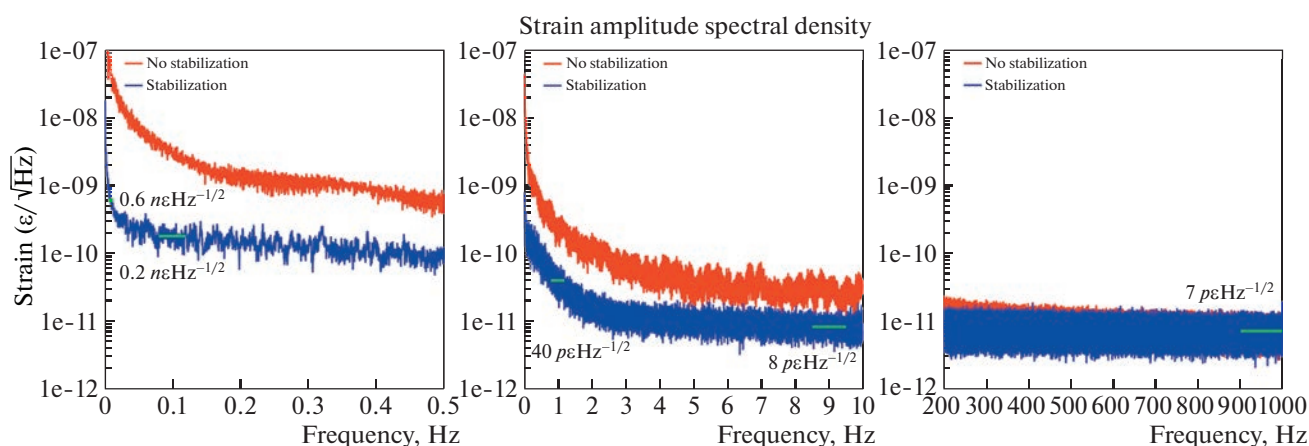


Рис. 3. Амплитудная спектральная плотность, усредненная по 11 пространственным каналам рефлектометра, для откликов, приведенных на рис. 2 для разных спектральных диапазонов.

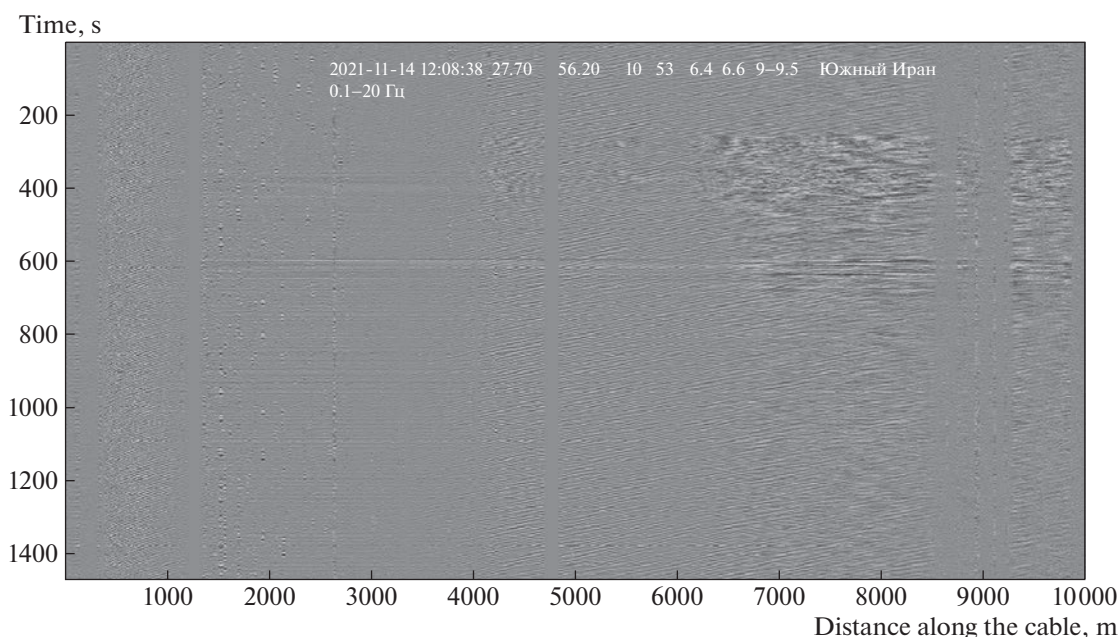


Рис. 4. Волновое сейсмическое поле, зарегистрированное когерентным фазовым рефлектометром. Горизонтальные линии в районе 300, 400, 500, 600 с — вступления различных компонент (Р- и S-волны) землетрясения с двумя толчками в Иране 14 ноября 2021 года. Градации серого обозначают амплитуду сейсмических волн в относительных единицах.

юге Ирана произошло землетрясение (в эпицентре очень сильное по шкале ШСИ-17) с $M = 6.3$. Через 1 мин (в 12 ч 08 мин гринвичского времени, т.е. в 15 ч 08 мин московского времени) произошел второй толчок (в эпицентре разрушительный по шкале ШСИ-17) с магнитудой $M = 6.4$. Экспериментальные данные, демонстрирующие регистрацию этого события, показаны на рис. 4. На рис. 5 показано взаимное расположение эпи-

центра землетрясения и места установки рефлектометра. На рис. 6 показана волновая форма зарегистрированного землетрясения.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможность эффективного применения предложенной схемы когерентного фазового рефлектометра со стабилизацией частоты зондирующего излучения в сейсмологических задачах.

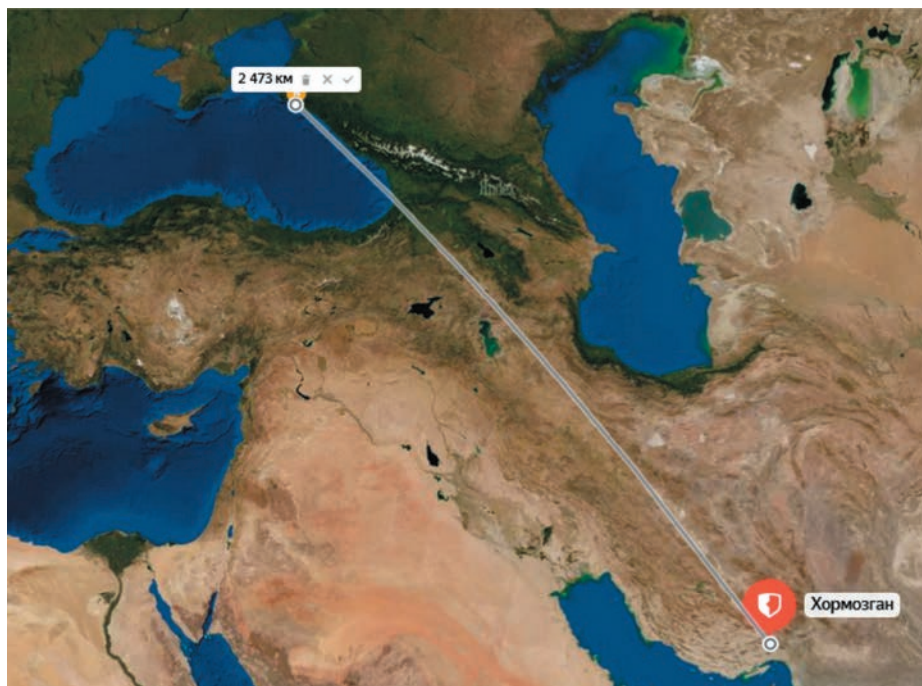


Рис. 5. Расположение эпицентра землетрясения. Расстояние от эпицентра до чувствительного кабеля когерентного фазового рефлектометра составляло примерно 2500 км.

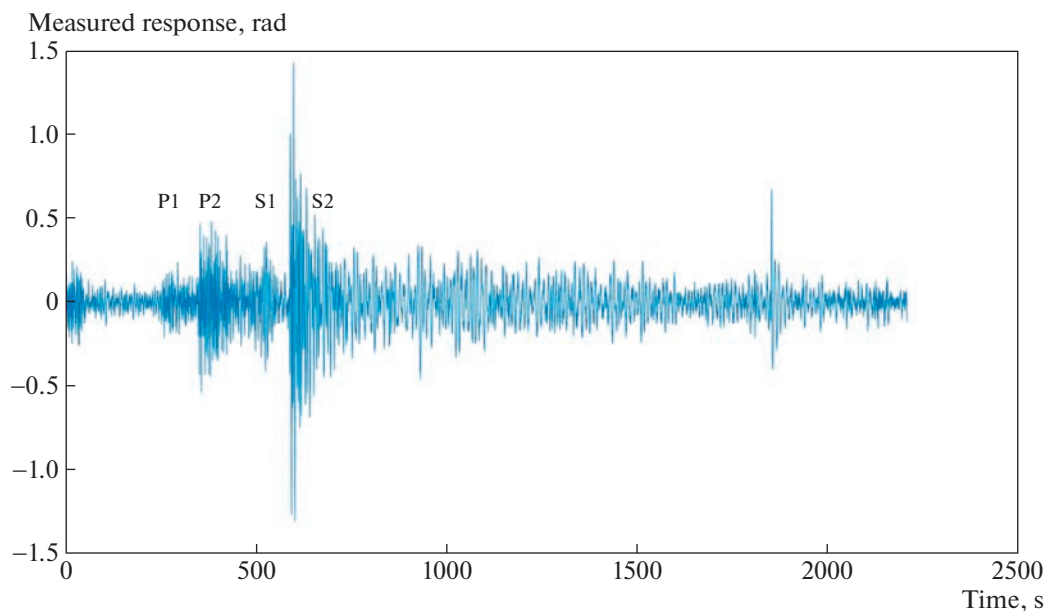


Рис. 6. Волновая форма землетрясения. Форма получена с помощью усреднения сигналов с участка кабеля 3000–4000 м и последующей фильтрацией в области 0.1–20 Гц. На осциллограмме явно выделяются Р- и S-компоненты двух толчков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая схема когерентного фазового рефлектометра со схемой генерации двойного зондирующего импульса, основанной на несбалансированном интерферометре Маха–

Цендера, а также со стабилизацией частоты источника лазерного излучения, использующей тот же интерферометр в схеме обратной связи. Схема позволяет достичь низкий уровень шума выходного сигнала в диапазоне субгерцовых частот,

представляющем интерес в геологических исследованиях. Работоспособность схемы продемонстрирована экспериментально в лабораторных условиях, а также при регистрации удаленных сейсмических событий.

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://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2478.12116>
2. *Williams E.F., Fernández-Ruiz M.R., Magalhaes R., Vant-hillo R., Zhan Z., González-Herráez M., Martins H.F.* // *Nature commun.* 2019. V. 10. P. 1. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13262-7>
3. *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
4. *Farhadiroushan M., Parker T.R., Shatalin S.* Patent WO2010136810A2. 2010. <https://patents.google.com/patent/WO2010136810A2/en>
5. *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>
6. *Dakin J.P., Lamb C.* UK Patent GB2222247A. 1990. <https://patents.google.com/patent/GB2222247A/en>
7. *Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Sergachev I.Y., Simikin D.E.* // *Quant. Electron.* 2014. V. 44. P. 965. <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2014v044n10ABEH015470>
8. *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>
9. *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>
10. *Hartog, A.H.* An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC press. 2017.
11. *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>
12. *Alekseev A.E., Tezadov Y.A., Potapov V.T.* // *Laser Phys.* 2017. V. 27. P. 055101. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/aa6378/>
13. *Hartog A., Kader K.* US Patent No. 9,170,149. 2015. <https://patents.google.com/patent/US9170149B2/en>
14. *Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X.* // *J. Lightwave Technol.* 2010. V. 28. P. 3243. <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-28-22-3243>
15. *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://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-61-28-8308>
16. *Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Zazirnyi D.V., Zazirnyi M.V.* Patent of Russian Federation No. 2477838. 2013. <https://patents.google.com/patent/RU2477838C1/ru>