

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.372.8

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С МАССИВАМИ СЛАБЫХ
ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ СИСТЕМ
КОГЕРЕНТНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ¹

© 2026 г. С. М. Попов*, Ю. К. Чаморовский, Д. В. Ряховский

*Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук*

Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

**E-mail: popov@fireras.su*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 05.06.2026

Работа посвящена созданию оптических волокон (ОВ) с повышенным обратным сигналом, во много раз превышающим уровень обратного сигнала рассеяния Рэлея для сенсорных линий систем когерентной рефлектометрии. Это достигается процедурой записи массивов волоконных брэгговских решеток (ВБР) в процессе вытяжки ОВ. Показана возможность записи массивов ВБР в стандартных телекоммуникационных волокнах типа ITU-G.652 для систем когерентной рефлектометрии с достаточным уровнем обратного сигнала. При этом уровень оптических потерь таких ОВ с массивами ВБР в телекоммуникационном диапазоне длин волн мало отличается от таковых для стандартных ОВ без массивов ВБР. В ходе экспериментов была изготовлена сенсорная линия длиной более 1 км, состоящая из 200 ВБР, записанных в процессе вытяжки ОВ с использованием chirпированной (с переменным периодом) фазовой маски и имеющих спектр отражения в диапазоне длин волн 1548–1552 нм. Данная сенсорная линия показала свою работоспособность в сочетании с когерентным рефлектометром, работающим в области длин волн 1550 нм.

Ключевые слова: специальные оптические волокна, массивы волоконных брэгговских решеток, когерентная рефлектометрия.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна проблема мониторинга территорий. Одним из вариантов такого мониторинга является акустический мониторинг с помощью распределенных волоконных систем методом когерентной рефлектометрии [1–4]. Принцип регистрации основан на зондировании оптических волокон (ОВ) (характеризующееся наличием естественных рассеивающих центров “вмороженными” и распределенными по всей длине ОВ,

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

так называемое рассеяние Рэлея) коротким импульсом с высокой когерентностью. Такие датчики имеют высокое пространственное разрешение (до 1 м) при общей длине линии до 45 км и максимальной величиной регистрируемой частоты сигнала до 50 кГц [4]. В совокупности с дальнейшей компьютерной обработкой данных, приходящих из системы когерентной рефлектометрии, становятся возможными обработка полученной информации и идентификация объектов, вызывающих акустическое воздействие [4, 5] (люди, их хождение или же просто речь, работа строительной техники, проезд транспорта). Разность величин чувствительности максимального и минимального сигнала таких систем достигает 120 дБ [4], однако он может ограничиваться как из-за несовершенства конструкции прибора, так и из-за конструкции чувствительного кабеля.

Фундаментальным ограничителем отношения сигнал/шум таких систем является низкий уровень рассеяния Рэлея (–82 дБ для импульса длиной 1 нс на длине волны 1550 нм для стандартного одномодового ОВ типа ITU-G.652 [6]). Для повышения чувствительности таких систем, а также для осуществления мониторинга на протяженных участках (длиной более 40 км) [4] существует задача увеличения величины обратного сигнала посредством записи в ОВ специальных отражателей [7–11]. Для реализации этого существуют две основные методики формирования таких отражателей, а именно, УФ-излучение [12] и лазерное излучение фемтосекундной длительности в ИК-диапазоне [13]. Для случая формирования УФ-излучения волоконных брэгговских решеток (ВБР) процесс записи осуществляется путем облучения ОВ УФ-излучением, проходящим через фазовую маску с последующим перепокрытием ОВ после процедуры формирования каждой ВБР [14]. Фемтосекундная технология записи отражателей позволяет осуществить формирование структуры ВБР через покрытие ОВ (без предварительного снятия покрытия) с помощью излучения лазера фемтосекундной длительности [15]. Главная проблема обеих технологий – это механическое воздействие на ОВ, что приводит к уменьшению прочности последнего. Даже самый “щадящий” (оптимизированный) режим формирования дефектов излучением фемтосекундной длительности приводит к уменьшению прочности одномодового ОВ типа ITU-G.652 с 9 до 2 ГПа [16], что крайне критично для его применения, поскольку оно может сломаться во время изготовления кабеля или во время использования самой системы. Альтернативным вариантом технологии формирования массивов ВБР с помощью УФ-излучения – это запись во время вытяжки ОВ с использованием фазовой маски [17–23] с последующей защитой ОВ полимерным покрытием.

К достоинствам ОВ с массивами ВБР для использования в сенсорных линиях систем когерентной рефлектометрии следует отнести возможность использования для записи ОВ с массивами ВБР относительно дешевых стандартных заготовок типа ITU-G.652, что позволяет

интегрировать такие ОВ с массивами ВБР в существующие линии связи. При этом величина обратного сигнала превышает уровень рассеяния Рэлея на величину до 55 дБ в телекоммуникационном диапазоне длин волн, а образцы имеют длину более 1 км при низком уровне дополнительных оптических потерь (менее 0.001 дБ/ВБР) [22]. Высокая прочность таких ОВ с массивом ВБР сопоставима с прочностью стандартного ОВ типа ITU-G.652 (8–9 ГПа [23]). Все это делает технологию записи массивов ВБР во время вытяжки наиболее подходящей для создания ОВ для чувствительных кабелей систем когерентной рефлектометрии [24].

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для записи массивов ВБР использовалась экспериментальная установка, описанная нами в работах [19–23]. Запись единичных ВБР в массиве выполнялась за один импульс источником УФ-излучения. В качестве источника УФ-излучения выступал импульсный эксимерный KrF-лазер Optosystems CL-5100 с длиной волны генерации 248 нм и выходным пучком размером $12 \times 5 \text{ мм}^2$ с типичной энергией 30 мДж при длительности импульса 10 нс. Плотность энергии импульса при записи непосредственно ВБР имела величину до 400 мДж/см². Для записи массивов использовались фазовые маски производства компании Ibsen Photonics с рабочей длиной 10 мм и периодом $\Lambda = 1070 \text{ нм}$. В эксперименте по созданию ОВ с расширенным спектром отражения использовалась chirпированная (с переменным периодом) фазовая маска с периодом $\Lambda = 1070\text{--}1073 \text{ нм}$.

Фазовая маска устанавливалась в непосредственной близости от вытягиваемого волокна. Типичная длина единичной ВБР определялась шириной лазерного пучка в вертикальной плоскости и рабочей длиной фазовой маски, составившей 10 мм. Заданный диаметр вытягиваемого ОВ (125 мкм) поддерживался с помощью лазерных измерителей диаметра на выходе из печи для размягчения кварцевого стекла и после узла нанесения защитного покрытия. Натяжение волокна имело величину 40 сН и контролировалось измерителем натяжения. Скорость вытяжки составила 6 м/мин. Плотность записи массивов ВБР составляла от 1 до 100%, т. е. ВБР полностью покрывали ОВ. Управление скважностью следования ВБР по длине ОВ (плотностью записи) достигалось за счет синхронизации скорости вытяжки и частоты следования импульсов УФ-лазера. Так, для частоты повторения импульсов 10 Гц и скорости вытяжки 6 м/мин достигалось полное 100-процентное заполнение ОВ единичными ВБР. Уменьшение частоты повторения импульсов до 5 Гц приводило к 50-процентному заполнению ОВ единичными ВБР при той же скорости вытяжки. В этом случае расстояние между единичными ВБР равно их длине, оно составляло 10 мм. Типичное отклонение коэффициента отражения от решетки к решетке доходило до 3 дБ. Вытяжка ОВ производилась при температуре около 1950 °С.

Запись массивов ВБР проводится как с использованием стандартной заготовки типа ITU-G.652 с разностью показателей преломления сердцевина–оболочка 0.005, так и с помощью специально синтезированной заготовки с германатно-силикатной сердцевиной с разницей показателей преломления сердцевина–оболочка 0.008. Второй тип применялся для эксперимента по созданию ОВ с массивами ВБР с расширенным спектром отражения.

Измерения оптических потерь ОВ с массивами ВБР выполнялись с помощью спектр-анализатора York S15. Спектр отражения определялся на спектр-анализаторе Yokogawa AQ6370 с галогеновой лампы и оптическим циркулятором. Измерение параметров массивов ВБР выполнялось методом частотной рефлектометрии [25] с помощью частотного рефлектометра LUNA 4600. Испытание полученных массивов ВБР выполнялось с помощью когерентного рефлектометра ВОСК-А ООО “Петрофайбер” [26], имеющего лазерный источник излучения, работающий в области длин волн около 1550 нм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1а показана типичная частотная рефлектограмма обратного сигнала массива ВБР, записанного в ОВ типа ITU-G.652. Контраст записи (превышение значения обратного сигнала над уровнем Рэлея) достигал величины 55 дБ. Измерения выполнялись на длине волны 1548 ± 0.65 нм. Типичная ширина спектра отражения 0.25–0.35 нм [18]. Зависимость величины оптических потерь от плотности заполнения ВБР показана на рис. 1б.

Рис. 1. Частотная рефлектограмма (а) массива ВБР, записанного в ОВ типа ITU-G.652 (плотность заполнения 50%). Спектральная зависимость потерь (б) массивов ВБР...

Типичная величина прироста потерь составляет величину менее 0.001 дБ/ВБР в области длин волн 1550 нм. При плотности заполнения до 10000 ВБР/км величина оптических потерь практически не отличается от величины потерь стандартных ОВ типа ITU-G.652 в области длин волн 1550 нм.

Актуальной задачей создания ОВ массивами ВБР для систем когерентной рефлектометрии является создание ОВ с относительно широкополосным спектром отражения [20, 21]. Это необходимо, поскольку системы когерентной рефлектометрии могут иметь источники излучения, работающие на разных длинах волн. Кроме того, ОВ сенсорных линий при их эксплуатации могут подвергаться различным воздействиям – изменению температуры окружающей среды или механическому воздействию (растяжению), а это приводит к изменению длины волны отражения отдельных ВБР массива в случае использования фазовой маски с постоянным периодом.

В ходе эксперимента была записана сенсорная линия с использованием chirпированной (с переменным периодом) фазовой маски общей длиной 1400 м, из которых 1000 м было

заполнено массивом ВБР из 200 штук (участок 2) и стыковочных линий, каждая из которых имела длину 200 м (участки 1 и 3). Спектральная зависимость коэффициента отражения данной сенсорной линии из 200 ВБР показана на рис. 2. Видно, что спектр отражения находится в диапазоне 1548–1552 нм. Величина коэффициента отражения единичной ВБР достигает значения $1-4.5 \cdot 10^{-5}$ (от –50 до –43 дБ/мм), что сопоставимо с результатами для массивов ВБР, записанных с использованием фазовой маски с постоянным периодом (рис. 1а).

Рис. 2. Спектр отражения массива из 200 ВБР, записанного с использованием chirпированной..

Рис. 3. Частотная рефлектограмма оптических потерь сенсорной линии, измеренная на длине

Рефлектограмма оптических потерь данной сенсорной линии, измеренная на длине волны 1545 нм (для исключения влияния отражения массива ВБР), показана на рис. 3. Измерения выполнялись подключением сенсорной линии к частотному рефлектометру Luna 4600. Дальний конец сенсорной линии имел “глухой” скел. Видно, что наклон участков 1, 2, 3 постоянен, что говорит о том, что процедура записи не вносит дополнительных оптических потерь. Величина оптических потерь на длине волны 1545 нм составляет менее 0.8 дБ/км, что несколько выше данных, показанных на рис. 1б, ввиду того что использовалась специально синтезированная германатно-силикатная заготовка. Данная сенсорная линия подключалась к когерентному рефлектометру ВОСК-А ООО “Петрофайбер”, работающему в режиме рефлектометра. Результаты измерений показаны на рис. 4–6.

Рис. 4. Величина обратного сигнала, измеренного с помощью когерентного рефлектометра...

Рис. 5. Фрагмент обратного сигнала ОБ с решетками, измеренного с помощью когерентного рефлектометра.

Рис. 6. Рефлектограммы фазовых сигналов трех отдельных каналов (1, 2, 3) когерентного рефлектометра.

На рис. 4 видно, что центральный участок длиной около 1 км (участок 2) характеризуется повышенным обратным сигналом по сравнению с участками 1 и 3 без ВБР. Увеличение обратного сигнала в конце участка 2 объясняется изменением режима записи, что вызвало повышенный обратный сигнал на последних 200 м участка 2 сенсорной линии.

На рис. 5 видно, что каждая ВБР дает повышенный обратный сигнал и что сигнал уменьшается между единичными ВБР до уровня обратного сигнала участков 1 и 3 (рис. 4). На рис. 6 показано, что фазовые сигналы трех отдельных каналов подобны, что подтверждает наличие отраженного сигнала от единичных ВБР, записанных в ОБ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Оптические волокна с массивами ВБР, записанные в процессе вытяжки, показали свою применимость для использования в качестве сенсорных линий для систем когерентной рефлектометрии. Конкурирующими аналогами данной методики изготовления массивов ВБР является методика поточечного формирования ВБР ультрафиолетовым излучением и перепокрывания ОВ с ВБР, а также технология фемтосекундной записи массивов ВБР. В первом случае количество ВБР в массиве ограничено. Это объясняется тем, что процедура перепокрывания ОВ приводит к снижению механической прочности, и такая линия при значительном количестве ВБР в массиве рано или поздно просто механически сломается. Во втором случае для варианта оптимизированной фемтосекундной записи общая прочность массива снижается до 2 ГПа [16]. Кроме того, полученные массивы будут иметь значительные потери на отражение ввиду значительного коэффициента отражения отдельных ВБР (более 1% в области длин волн 1550 нм) [15]. Для случая так называемых нанорешеток (точечных дефектов, формируемых фемтосекундным излучением) [27] будут наблюдаться повышенные потери (так называемые серые потери) ввиду нерезонансного взаимодействия распространяющегося излучения и дефектов. При этом оптические потери могут иметь величину около 1000 дБ/км в области длин волн 1550 нм при контрасте записи 50 дБ [28] и плотности заполнения 100%. Таким образом, по совокупности всех рассмотренных выше особенностей предложенный метод повышения уровня обратного сигнала в когерентных волоконных системах мониторинга представляется оптимальным для большинства случаев.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований были получены образцы ОВ для использования в качестве сенсорных линий систем когерентной рефлектометрии, записанных с использованием стандартного телекоммуникационного ОВ типа ITU-G.652 с обратным сигналом, уровень которого превышает уровень рассеяния Рэлея (до 55 дБ) с длинами до 1 км. При этом уровень оптических потерь таких ОВ с массивами ВБР в телекоммуникационном диапазоне длин волн мало отличается от такового для стандартных ОВ без массивов ВБР. Использование чирпированной фазовой маски (с переменным периодом) позволило расширить спектр отражения ОВ с массивом ВБР до 4 нм, что дало возможность использовать данные массивы с когерентными рефлектометрами с лазерными источниками в диапазоне 1548–1552 нм. Данная сенсорная линия показала свою работоспособность в сочетании с когерентным рефлектометром ВОСК-А ООО “Петрофайбер”. Все сказанное выше свидетельствует о том, что полученные ОВ с массивами ВБР – хорошая замена стандартных телекоммуникационных ОВ типа ITU-G.652, когда требуется обратный сигнал, уровень которого во много раз

превышает уровень рассеяния Рэлея для сенсорных линий систем когерентной рефлектометрии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Б.Г.Горшкову за помощь в проведении работ с использованием когерентного рефлектометра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-00395-25-03.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V.* Opt. Lett. 1992. V. 17. № 22. P. 1623. <https://doi.org/10.1364/OL.17.001623>
2. *Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J.*, Appl. Opt. 1998. V. 37. № 24. P. 5600. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005600>
3. *Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E.* Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. № 5. P. 843. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050020>
4. Интернет-сайт фирмы Silixa, Великобритания: Intelligent Distributed Acoustic Sensor (iDAS™) <https://silixa.com/technology/idas-intelligent-distributed-acoustic-sensor/>
5. *Грознов Д.И., Леонов А.В., Наний О.Е., Нестеров Е.Т., Треицков В.Н.* Экспозиция. Нефть Газ. 2014. № 4. С. 51. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21953327>
6. *Turitsyn S.K., Babin S.A., Churkin D.V., Vatnik I.D., Nikulin M., Podivilov E.V.* Phys. Rep. 2014. V. 542. P. 133. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.4>
7. Интернет-сайт фирмы Silixa, Великобритания: Carina® Sensing System <https://silixa.com/technology/carina-sensing-system/>
8. *Mengshi Wu, Xinyu Fan, Qingwen Liu, Zuyuan He.* Opt. Lett. 2018. V. 43. № 15. P. 3594. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003594>
9. *Naldrett G., Cerrahoglu C., Mahue V.* Petrophysics. 2018. V. 59. № 4. P. 496. <https://doi.org/10.30632/PJV59V4-2018a5>
10. *Kharasov D.R., Bengalskii D.M., Vyatkin M.Yu. et al.* Quantum Electron. 2020. V. 50. № 5. P. 510 <https://doi.org/10.1070/QEL17232>
11. *Фомиряков Э.А., Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Наний О.Е., Никитин С.П., Треицков В.Н.* Автометрия. 2023. Т. 59. № 1. С. 87. <https://doi.org/10.15372/AUT20230109>
12. *Hill K.O., Malo B., Bilodeau R, Johnson D.C., Albert J.* Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 10. P.1035. <https://doi.org/10.1063/1.108786>

13. Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. Opt. Lett. 2006. V. 31. № 11. P. 1603.
<https://doi.org/10.1364/OL.31.001603>
14. Wang Y., Gong J., Dong B., Wang D.Y., Shillig T. J., Wang A. J. Lightwave Technol. 2012. V. 30. P. 2751. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2205897>
15. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. Opt. Express. 2016. V. 24. P. 16232. <https://doi.org/10.1364/OE.24.016232>
16. Butov O.V., Przhiiialkovskii D.V., Lopunov A.I. Pnev A.B. Opt. Laser Technol. 2023. V. 162. P. 109271. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109271>
17. Guo H., Tang J., Li X., Zheng Y., Yu H., Yu H. Chin. Opt. Lett. 2013. V. 11. P. 030602
<https://doi.org/10.3788/COL201311.030602>
18. Lindner E., Mörbitz J., Chojetzki C. et al. Third Asia Pacific Optical Sensors Conference. 2012. V. 8351. P. 835112. <https://doi.org/10.1117/12.913625>
19. Зайцев И.А., Бутов О.В., Волошин В.В. и др. Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 6. С. 602. <https://doi.org/10.7868/S003384941606022X>
[Zaitsev I.A., Butov O.V., Voloshin V.V. et al. J. Commun. Technol. Electron. 2016. V. 61. No. 6. P. 639. <https://doi.org/10.1134/S106422691606022X>]
20. Попов С.М., Бутов О.В., Колосовский А.О. и др. Квантовая электроника. 2019. Т.49. № 12. С. 1127. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41537726>
[Popov S.M., Butov O.V., Kolosovskii A.O. et al. Quantum Electron. 2019. V. 49. № 12. P. 1127 <https://doi.org/10.1070/QEL17157>]
21. Попов С.М., Бутов О.В., Колосовский А.О. и др. Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 12. С. 1101. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48512039>
[Popov S.M., Butov O.V., Kolosovskii A.O. et al. Quantum Electron. 2021. V. 51. № 12. P. 1101 <https://doi.org/10.1070/QEL17659>]
22. Попов С.М., Ряховский Д.В., Колосовский А.О. и др. Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 10. С. 798. <https://elibrary.ru/item.asp?id=80374379>
[Popov S.M., Ryakhovskii, D.V., Kolosovskii A.O. et al. Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. V. 50. Suppl. 13. P. S1464 <https://doi.org/10.3103/S1068335623602376>]
23. Chamorovskiy Yu.K., Butov O.V., Kolosovskiy A.O., et al., Optical Fiber Technology. 2017. Vol. 34, P. 30 <http://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.12.008>
24. Чаморовский Ю. К., Попов С. М., Судас Д. П. и др. Радиотехника и Электроника. 2025. Т. 70, №4, С. 384. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82536799>
[Chamorovskiy Yu. K., Popov S.M., Sudas D.P., et al. Journal Of Communications Technology And Electronics. 2025. V. 70, No. 4. P.348. <https://doi.org/10.7868/S30345901250408e6>]

25. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. Opt. Express. 2005. V. 13. P. 666
<https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>
26. Интернет сайт компании ООО Петрофайбер: <https://petrofibre.ru/products/>
27. Yan A., Huang S., Li, S. et al. Sci Rep. 2017. V.7. P. 9360. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09934-3>
28. Wang M., Zhao K., Huang S. et al. IEEE Sens. J. 2020. V.20. P.11335.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2995606>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Частотная рефлектограмма (а) массива ВБР, записанного в ОВ типа ITU-G.652 (плотность заполнения 50%). Спектральная зависимость потерь (б) массивов ВБР, записанных в ОВ типа ITU-G.652 для следующих значений плотности записи: 1 – 50000 ВБР/км (50%), 2 – 4000 ВБР/км (4%), 3 – без ВБР (0%)
- Рис. 2.** Спектр отражения массива из 200 ВБР, записанного с использованием chirпированной фазовой маски
- Рис. 3.** Частотная рефлектограмма оптических потерь сенсорной линии, измеренная на длине волны 1545 нм для следующих участков: 1 – 200 м (без ВБР), 2 – 1000 м (200 ВБР), 3 – 200 м (без ВБР)
- Рис. 4.** Величина обратного сигнала, измеренного с помощью когерентного рефлектометра для следующих участков: 1 – 100 м (без ВБР), 2 – 1000 м (200 ВБР), 3 – 100 м (без ВБР)
- Рис. 5.** Фрагмент обратного сигнала ОВ с решетками, измеренного с помощью когерентного рефлектометра
- Рис. 6.** Рефлектограммы фазовых сигналов трех отдельных каналов (1, 2, 3) когерентного рефлектометра. Величины фазы сигналов для каналов 2 и 3 смещены на -0.05 и 0.1 соответственно

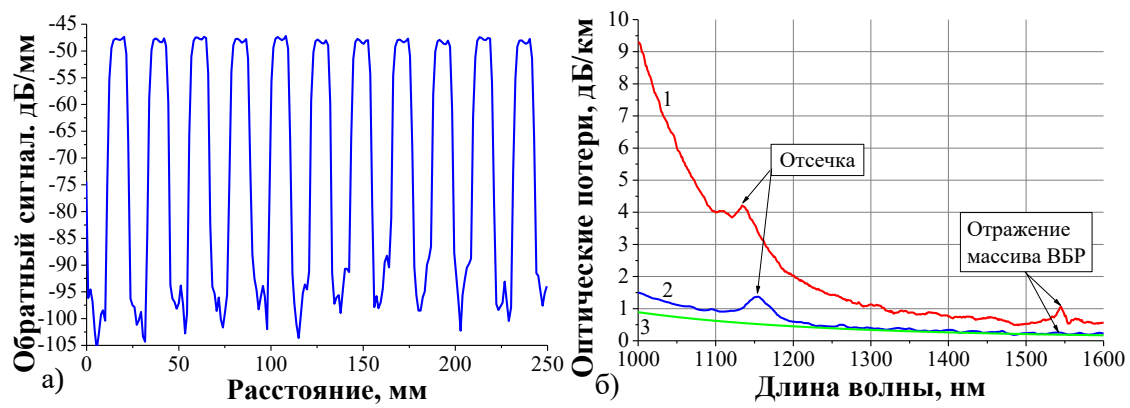


Рис. 1.

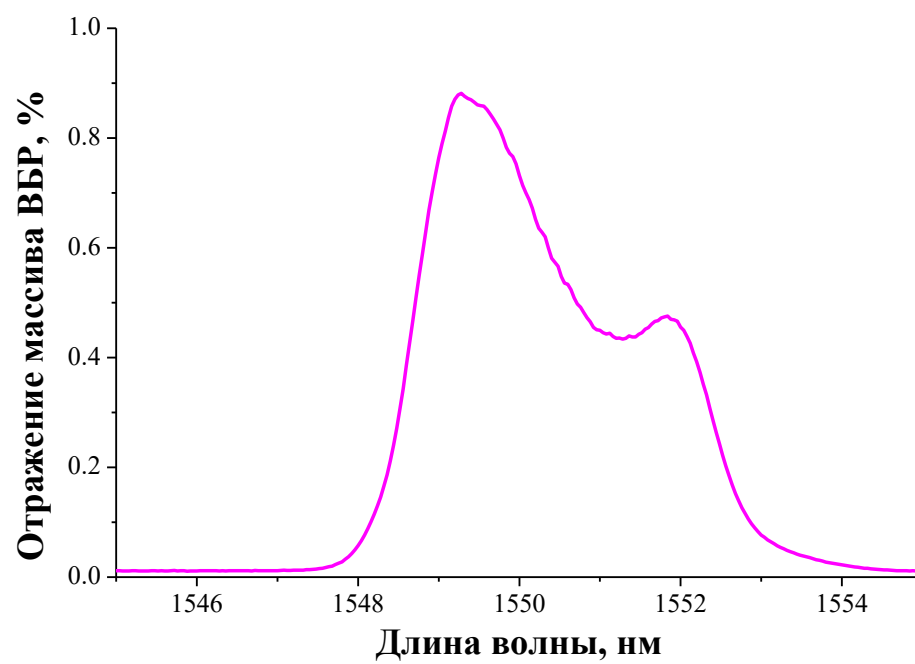


Рис. 2.

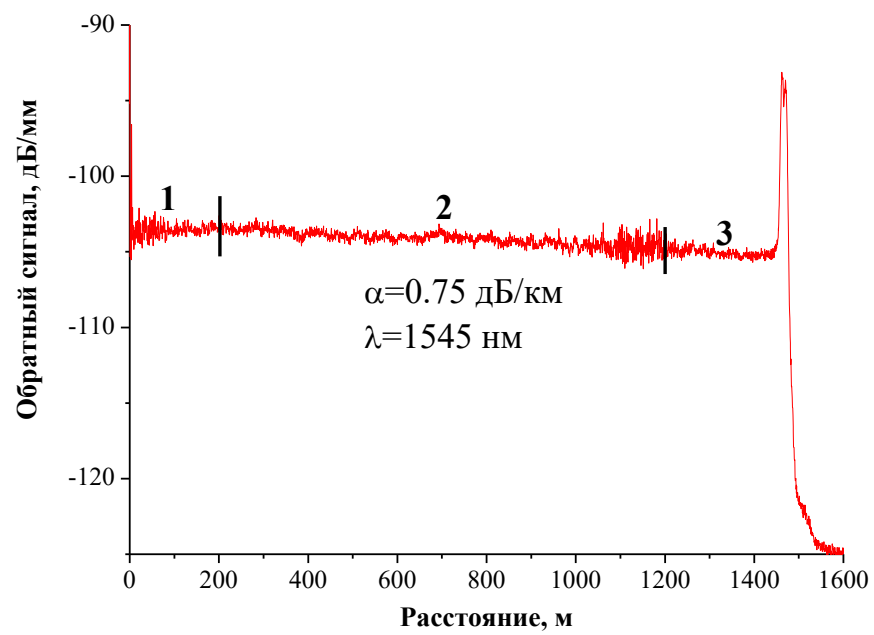


Рис. 3.

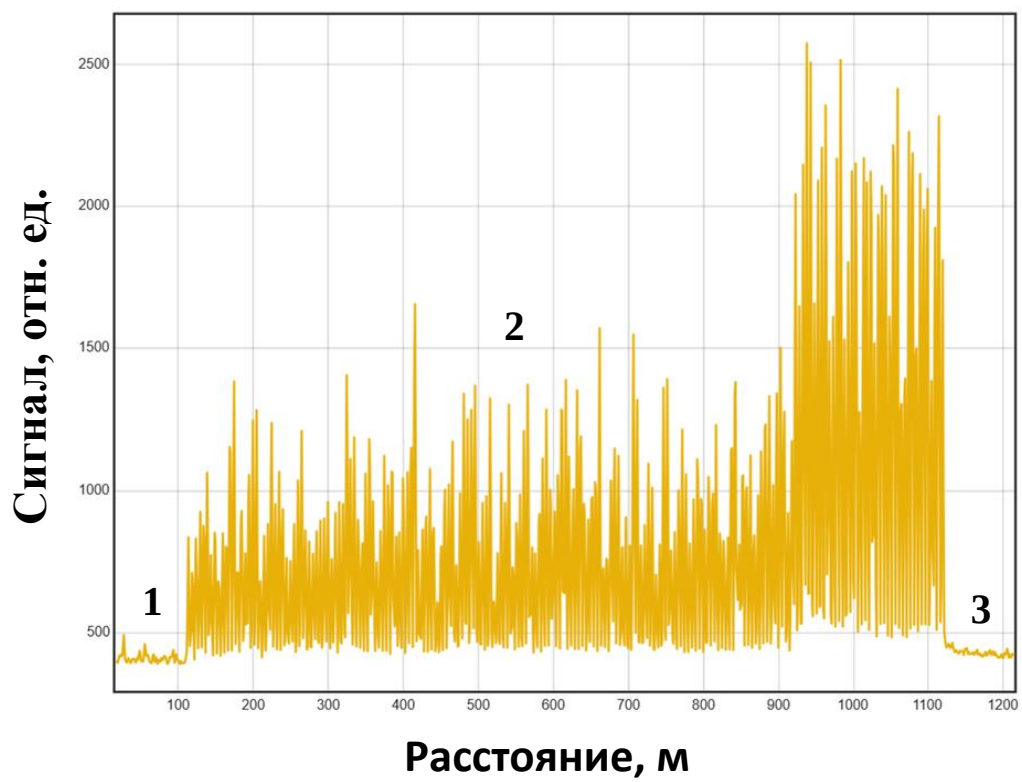


Рис. 4.

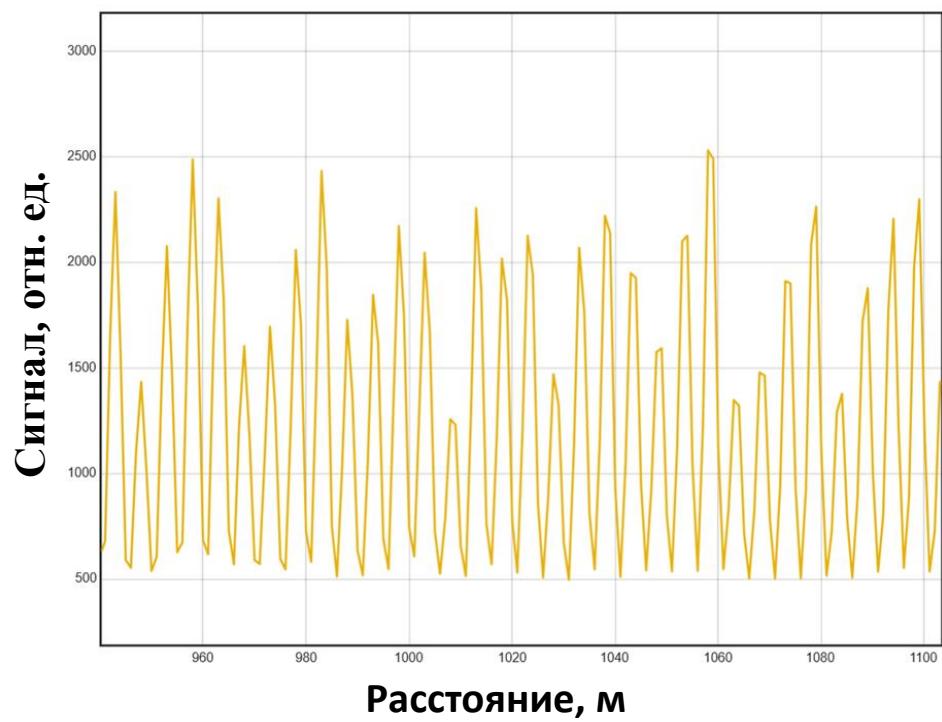


Рис. 5.

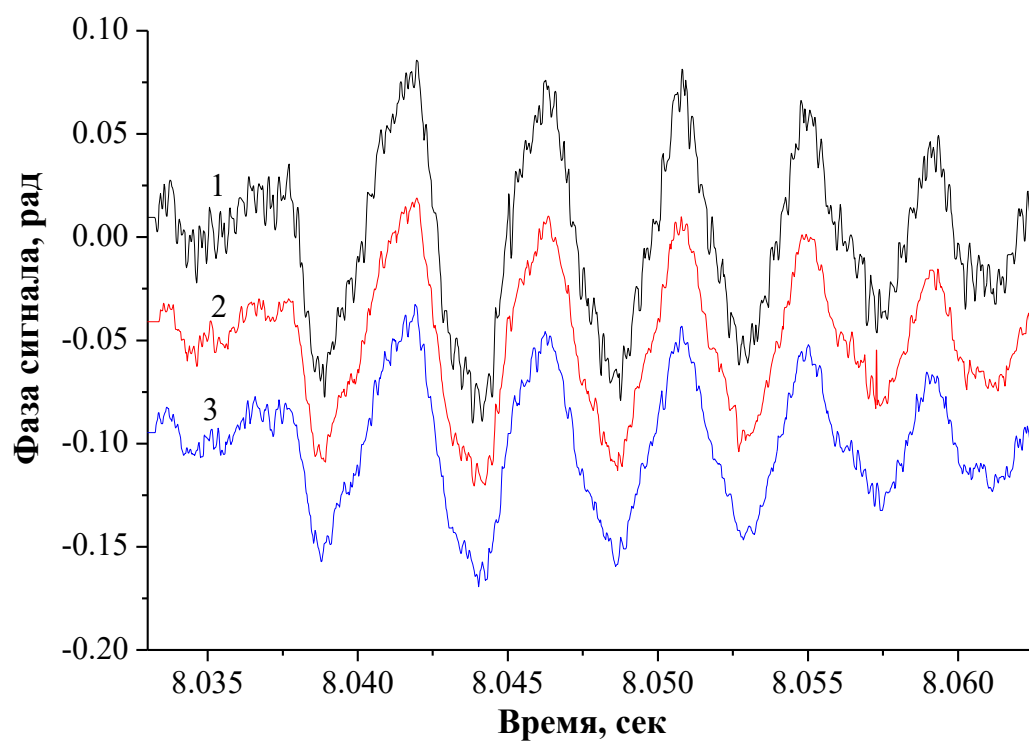


Рис. 6.