

**СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ
РЕГИСТРИРУЕМОГО ОПТИЧЕСКИМ РЕФЛЕКТОМЕТРОМ ЧАСТОТНОЙ
ОБЛАСТИ ОБРАТНО-РАССЕЯННОГО РЭЛЕЕВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ ДВУХКАСКАДНОГО ЭРБИЕВОГО УСИЛЕНИЯ¹**

© 2023 г. М. Е. Белокрылов^{a,*}, Д. Клод^a, Ю. А. Константинов^a, П. В. Карнаушкин^{a,b},
К. А. Овчинников^c, В. В. Криштоп^{b,c,d}, Д. Г. Гилев^{b,c}, Ф. Л. Барков^a, Р. С. Пономарев^{a,b}

^aПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

^bПермский государственный университет
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^cПермская научно-производственная приборостроительная компания
Россия, 614007, Пермь, ул. 25 Октября, 106

^dПермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

*e-mail: belokrylovme@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 05.03.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Описываются простые меры по повышению отношения сигнал/шум показаний оптического рефлектометра частотной области (OFDR). После применения двухкаскадного оптического усиления обратно-рассеянного сигнала, а также устранения источника паразитных отражений удалось добиться увеличения отношения сигнал/шум рефлектограммы частотной области с 8 дБ до 19 дБ. Данная техника может быть применена в волоконно-оптической сенсорике и метрологии волоконно-оптических и интегрально-оптических элементов.

DOI: 10.31857/S0032816223050178, EDN: ZUWZVO

1. ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические сенсоры достаточно плотно вошли в нашу жизнь [1–3]. Весомую их долю представляют рефлектометрические системы разного вида [4–8]. Улучшение параметров рэлеевских рефлектометров частотной области (optical frequency domain reflectometer, OFDR) для исследования таких элементов, как специальные оптические волокна и интегрально-оптические схемы с высоким пространственным разрешением, является важной задачей распределенной волоконно-оптической метрологии и сенсорики [9, 10]. На основе рефлектометров частотной области функционирует внушительное количество распределенных систем измерения деформации и температуры, применяемых в мониторинге состояния конструкций, устройств, объектов инфраструктуры, транспортных средств.

Существуют два основных способа измерения влияния температуры и деформации на обратно-рассеянное излучение в частотной области. Первый из них предусматривает выполнение прямого и обратного преобразований Фурье с последующим вычислением взаимно-корреляционной функции между данными, полученными в невозмущенном состоянии и при физическом воздействии на сенсор [11]. Второй способ основан на исследовании влияния внешних воздействий на фазовый спектр сигнала OFDR [12]. Оба этих метода подвержены влиянию фазовых шумов и шумов интенсивности, ограничивающих их предельные характеристики по пространственному разрешению и предельному измеряемому расстоянию. Методам борьбы с фазовыми шумами посвящено довольно большое количество исследований, предлагающих различные методы их компенсации при постобработке сигнала [13]. Шумы интенсивности же, по сути, определяются уровнем выходной мощности перестраиваемого лазера, его стабильностью и качеством используемых в схеме компонентов: фотоприемников, аналого-

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).

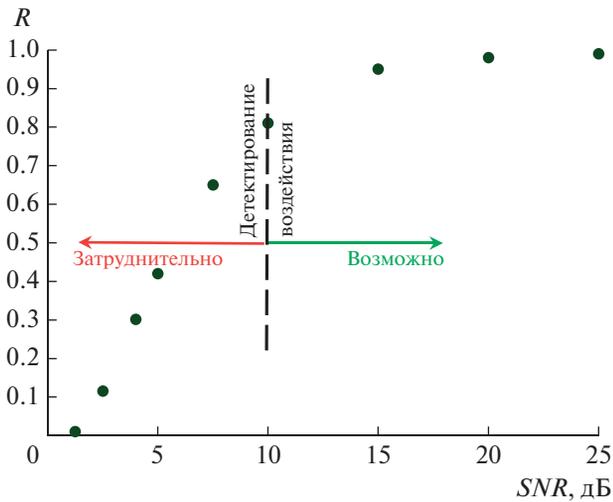


Рис. 1. Зависимость максимального значения пика взаимно-корреляционной функции обратных спектров сигналов, полученных для нагруженного состояния и состояния покоя. Адаптировано из работы [11].

цифровых преобразователей и оптических элементов системы. Таким образом, борьба с шумом интенсивности подразумевает увеличение отношения сигнал/шум (SNR) регистрируемого сигнала.

В работе [11] было проведено численное моделирование зависимости коэффициента корреляции последовательных измерений от отношения сигнал/шум. На рис. 1 показана зависимость коэффициента корреляции пика взаимно-корреляционной функции обратных спектров сигналов,

полученных для двух последовательных измерений. Показано, что при $SNR < 10$ дБ происходит резкий спад коэффициента корреляции. Чем выше коэффициент корреляции, тем четче выделяется корреляционный пик (рис. 2) и тем точнее локализуется его частотная координата, а значит, точнее определяется частотный сдвиг, вызванный внешними воздействиями, и пересчитанные из него температура и деформация.

Современные системы рэлеевских OFDR демонстрируют значения SNR до 20 дБ, однако с увеличением измеряемой длины линии или при наличии в линии оптических компонентов, вносящих существенные потери в сигнал, повышение отношения сигнал/шум является важной задачей улучшения параметров частотных рефлектометров и расширения области их применения.

Определение SNR рефлектограммы частотной области представлено на рис. 3. Как можно заметить, в конце линии длиной 25 км SNR составляет 15 дБ, этого достаточно для сенсорных применений. Однако несложно оценить, что удлинение линии на 30 км типовым одномодовым телекоммуникационным волокном приведет к снижению коэффициента корреляции ввиду низкого (менее 10 дБ) значения SNR .

В данной работе предлагается эффективный способ увеличения отношения сигнал/шум получаемых данных обратного рассеяния при помощи двухкаскадного эрбиевого усиления получаемого сигнала и прочих простых программно-аппаратных мер.

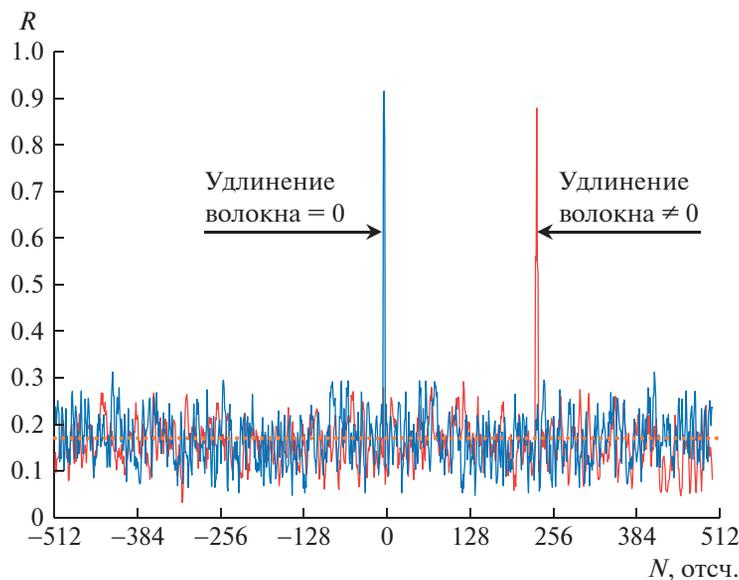


Рис. 2. Пример взаимно-корреляционной функции обратных спектров сигналов, полученных для нагруженного состояния и состояния покоя. Адаптировано из работ [11, 13].

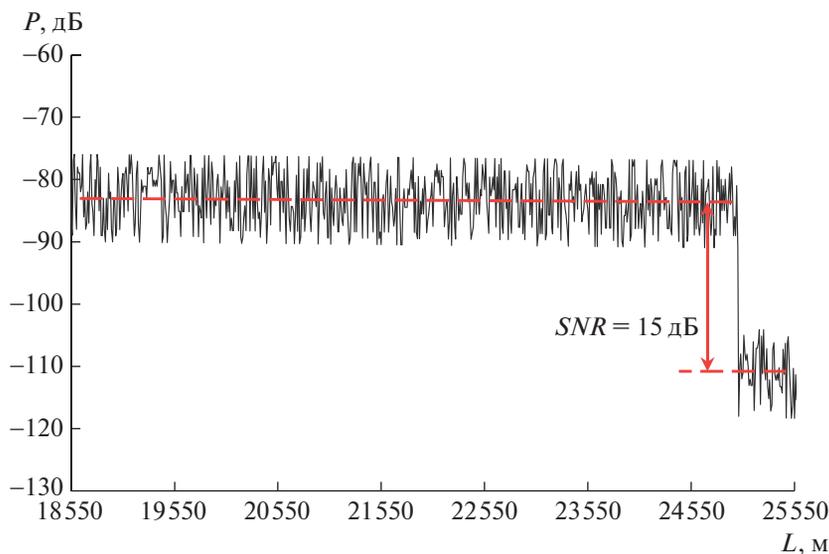


Рис. 3. Определение SNR рефлектограммы частотной области. Адаптировано из работы [11].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Главным элементом экспериментального стенда (рис. 4, 5) является сканирующий по частоте узкополосный лазер Keysight 81606A (1), осуществляющий циклическое линейное перестроение длины волны излучения с 1530 до 1570 нм со скоростью 200 нм/с. Излучение, пройдя волоконный выход лазера, попадает на оптический изолятор Thorlabs-IO-N-1550 Fiber Isolator (2), который обеспечивает защиту излучателя от обратных отражений внутри схемы. Далее излучение делится каплером AFR 1 × 2 Coupler 1/99-1530-1570 (3) на две компоненты: 99% оптической мощности направляются в основной интерферометр, 1% – во вспомогательный. Основной интерферометр состоит из двух делителей, 8 и 10, и циркулятора 9, обеспечивающих интерференцию исходного излучения с рассеянным на заданной длине волны. Один из делителей в интерферометре PNPPK99.1-0.1-1550 (8), разветвляющий схему на прямую и обратные ветви, имеет соотношение разделяемых оптических мощностей 99.9% к 0.1%. Это необходимо для того, чтобы компоненты излучения, интерферирующие на другом делителе, имели близкие друг к другу оптические мощности (рэлеевская компонента обратного рассеяния изначально менее интенсивна, чем прямая). Вспомогательный интерферометр необходим для отслеживания функции перестройки длины волны (поскольку практически во всех лазерах данная перестройка по факту не является строго линейной) и для компенсации фазовых шумов. В одном из плеч основного интерферометра были установлены аттенюатор Thorlabs VOA50 (5) и контроллер поляризации Thorlabs FPC564 (6), предназначенный для устранения эффекта поля-

ризационных замираний. Второе плечо вспомогательного интерферометра было удлинено линией задержки, реализованной на оптическом волокне Corning SMF28e.

Детектирование сигнала основного интерферометра осуществлялось фотодетектором Femto HSA-S-200 (12), регистрация показаний вспомогательного интерферометра проводилась при помощи фотоприемника Thorlabs PDA05CF2 (13), оцифровка всех сигналов осуществлялась при помощи цифрового осциллографа Tektronix DPO7254 (14) на частоте 20 МГц, частота биений вспомогательного интерферометра составила 6 МГц. Обработка сигнала осуществлялась на персональном компьютере (15). Сенсорный элемент длиной 10 м представлял собой фрагмент одномодового изотропного оптического волокна марки SMF28e (16), уложенного в лаборатории бухтой. К выходному торцу исследуемого образца было приварено дуговой сваркой 0.5 м бессердцевинного оптического волокна 17, чтобы избежать сильного френелевского отражения в конце линии. На первом шаге регистрация данных осуществлялась без предварительного усиления 19. После обработки сигнала, которая будет рассмотрена в следующем разделе, было принято решение осуществить двухкаскадное усиление регистрируемого излучения при помощи эрбиевого предусилителя Amonics AEDFA-PA-35 (11). Поскольку на данной стадии движения изучения по схеме интерференция уже фактически произошла в каплере 10, данный сигнал не имеет серьезных требований по когерентности. В некоторых экспериментах для достижения более высоких частот дискретизации получаемых сигналов, а также прямого детектирования состояния поляризации и фазы сигнала вместо эле-

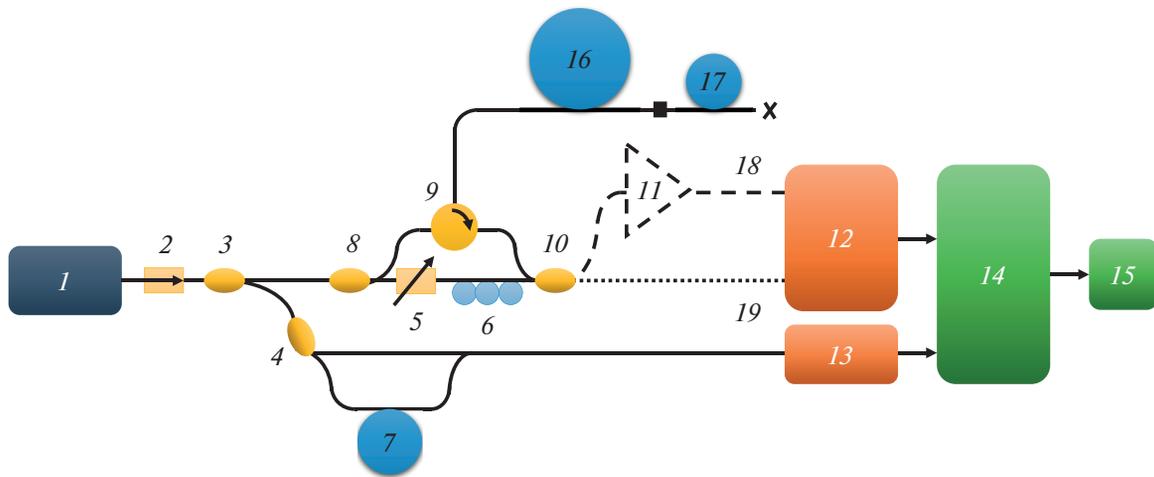


Рис. 4. Схема рефлектометра частотной области.



Рис. 5. Внешний вид экспериментального стенда.

ментов схемы 10, 11 и 12 использовался гибридный детектор Keyang Photonics KY-ICR-1G-FA.

3. РАБОТА СХЕМЫ БЕЗ ДВУХКАСКАДНОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

На рис. 6–8 показаны получаемые на установке данные без оптического усиления детектируемого сигнала. Рисунок 6 демонстрирует исходный сигнал, зарегистрированный детектором основного интерферометра (элементы схемы 5, 6, 8, 9, 10, 12, 19). По оси абсцисс — время (с), по оси ординат — напряжение (В), выдаваемое фотодетектором основного интерферометра после электрического предусиления. Фотодетектор фиксировал прямую (основную) часть перестройки лазера

— вверх по длине волны излучения. Обратный ход исключался из расчетов. Синхронизация приемной и передающей частей была осуществлена подачей триггерного сигнала с выхода лазера на отдельный канал осциллографа.

Классический подход OFDR требует осуществления дискретного быстрого преобразования Фурье полученных данных. Однако нелинейность перестройки лазера существенно искажает сигнал, и перед преобразованием Фурье необходимо осуществить равночастотную передискретизацию данных. На рис. 7 представлен сигнал вспомогательного интерферометра. Эти данные использовались для пересчета значений интенсивности излучения, регистрируемой основным измерительным каналом. Для этого из вспомогательного сигнала использовались только те от-

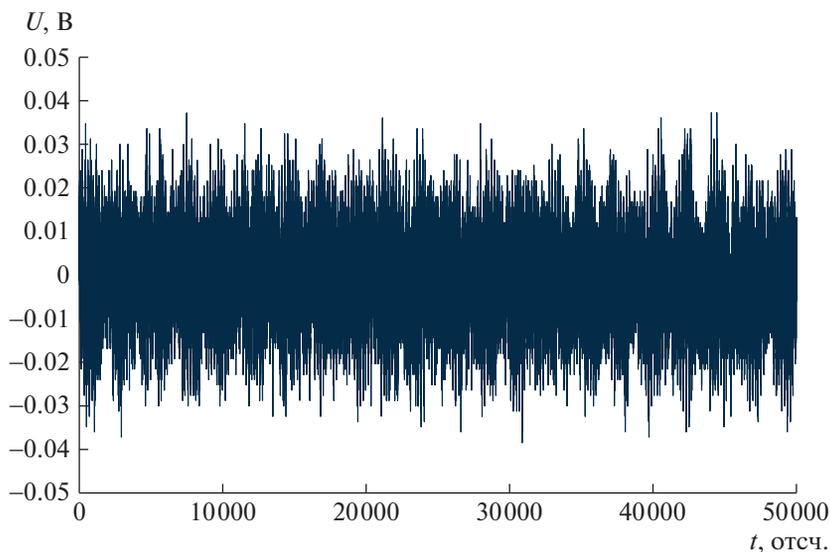


Рис. 6. Полученные с основного интерферометра данные (до компенсации нелинейности перестройки лазера). Напряжение U на фотодетекторе прямо пропорционально регистрируемой интенсивности оптического сигнала.

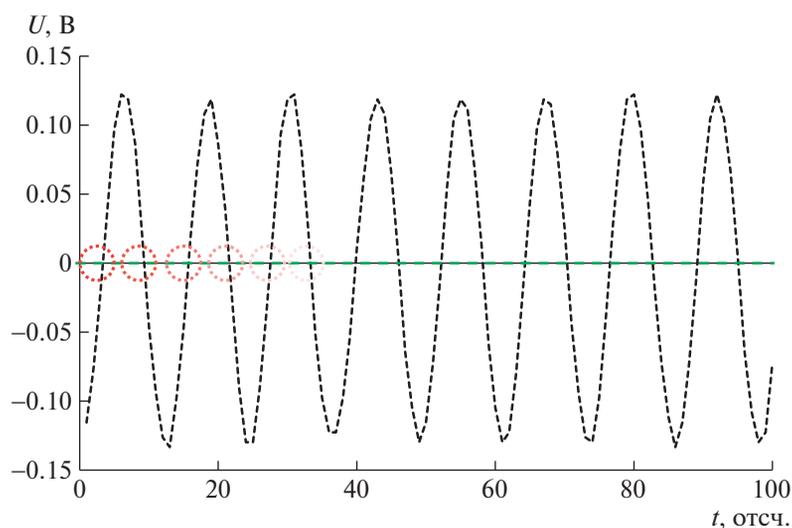


Рис. 7. Сигнал вспомогательного интерферометра. Напряжение U на фотодетекторе прямо пропорционально регистрируемой интенсивности оптического сигнала.

счета, значения которых были ближе всего к нулевым и для которых гарантируется равный прирост фазы (в области пересечения функцией нулевого значения), как это было показано в работах [14, 15]. По этим значениям переформировывался массив данных с основного интерферометра. Такая процедура называется в литературе методом ZCT (zero-crossing trigger). Также существует более совершенная ее модификация — метод равночастотной дискретизации (equal frequency resampling, EFR), подразумевающая передискретизацию сигнала равномерным шагом прироста частоты излучения.

Результат быстрого преобразования Фурье полученных таким образом данных представлен на рис. 8. По оси абсцисс отложена длина волокна (проградуированная в частотах интерференционного биения основного интерферометра, Гц), ось ординат представлена в децибелах (дБ). На рисунке крупно показан выходной торец волокна. Крупное, пологое событие (серый график) — аномально протяженное отражение от границы раздела сред кварц/воздух (до подварки бессердцевинного волокна в исходном состоянии без обработки). Два резких пика в его центре — отражающее событие после обработки методом ZCT (оранжевый гра-

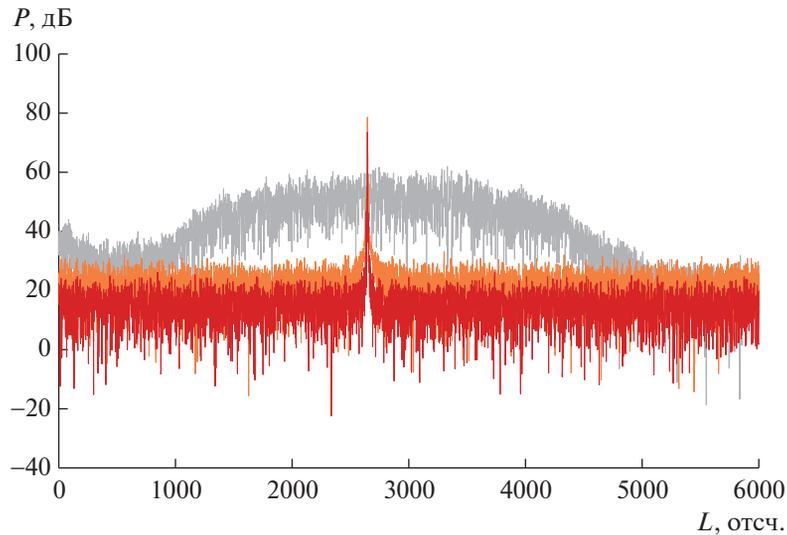


Рис. 8. Полученные данные до процедур прореживания и после них.

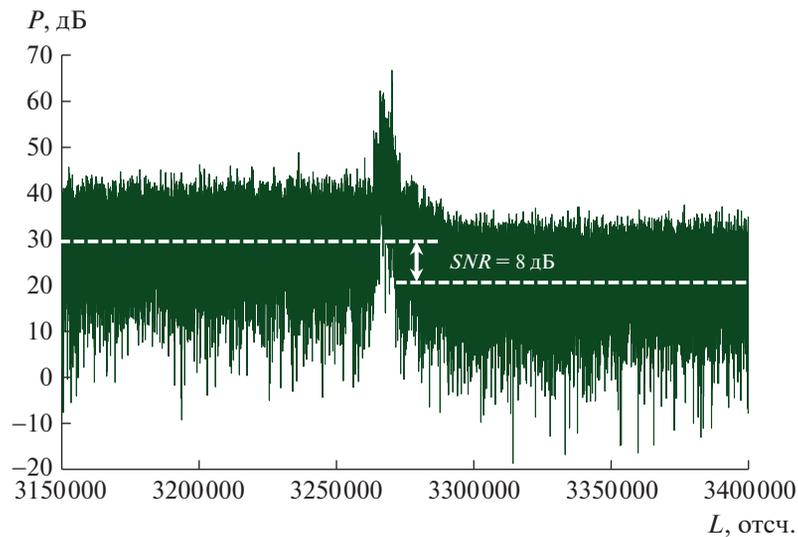


Рис. 9. Рефлектограмма исследуемого волокна (эксперимент без усиления).

фик) и методом EFR (красный график). Продолжительность этого события здесь описывается уже несколькими десятками микрон, что близко к теоретическому пределу метода OFDR.

В итоге варианты с прореживанием по времени использовались для уточнения координат событий на рефлектограмме и предшествовали расчету корреляционных функций на этапе постобработки; в то же время вариант без прореживания по времени применялся для контроля эксперимента в реальном времени. Рефлектограмма, полученная после преобразования Фурье в реальном времени прямо на осциллографе, представлена на рис. 9.

4. РАБОТА СХЕМЫ С ДВУХКАСКАДНЫМ ОПТИЧЕСКИМ УСИЛИТЕЛЕМ

На рис. 10 показана пропись сигнала основного интерферометра с подключенным двухкаскадным оптическим эрбиевым предусилителем. На рис. 10 видно, что к сигналу добавилась флуктуирующая низкочастотная компонента, незаметная на быстрых преобразованиях Фурье для этих данных, при этом SNR увеличился до 19 дБ (рис. 11).

Вариация токов накачки позволила установить оптимальные токи для обоих усилительных каскадов — 70 мА. Однако повторяемость экспе-

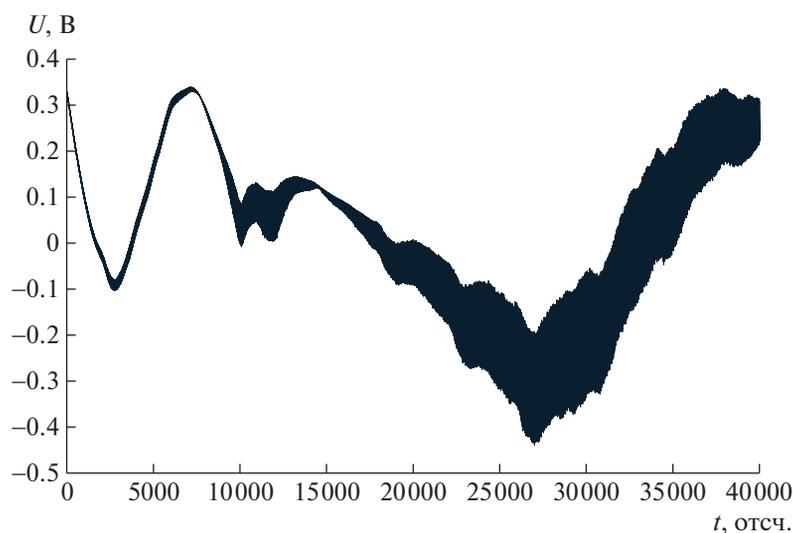


Рис. 10. Две последовательно снятые прописи сигнала основного интерферометра с подключенным двухкаскадным оптическим эрбиевым предусилителем. Напряжение U на фотодетекторе прямо пропорционально регистрируемой интенсивности оптического сигнала.

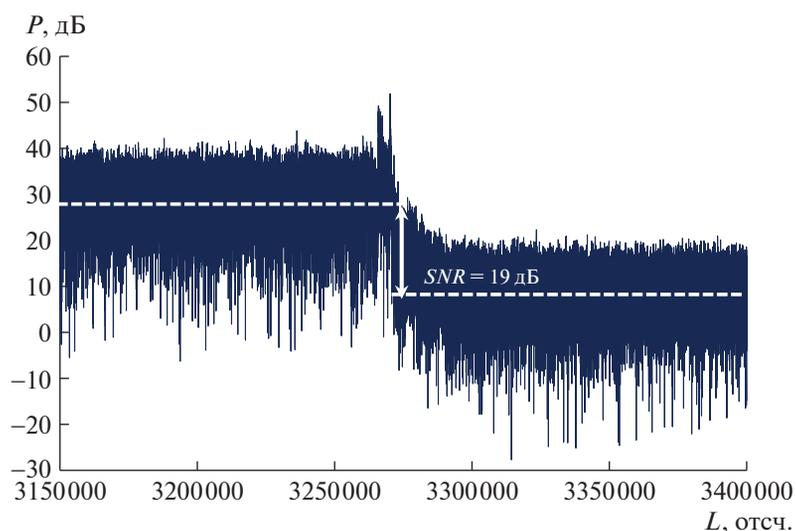


Рис. 11. Рефлектограмма исследуемого волокна (эксперимент с усилением).

римента от запуска к запуску давала вариации SNR до 5 дБ, что, по мнению авторов, связано с проблемами синхронизации лазера и аналого-цифрового преобразователя, приведшими к некорректной реакции системы авторегулирования внутри фабричного усилителя. Предпочтительнее использовать оптический усилитель без авторегулирования.

Подварка бессердцевинного волокна 17 к торцу исследуемого образца вкупе с подстройкой поляризационного контроллера 6 позволили линеаризовать амплитудный отклик рефлектограммы и избавиться от фантомных пиков. После тестирования, а также отдельного и совместного приня-

тия различных мер для увеличения SNR авторы получили корректный температурный отклик с помощью вычисления корреляционных функций OFDR (образец SMF28, 14 м, точность локализации воздействия – 1 мм, точность определения температуры – десятые градуса Цельсия).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанные меры позволили увеличить отношение сигнал/шум рефлектограммы, а также снизить влияние мощного отражения от выходного торца исследуемого волокна на изучаемый сигнал. Температурные и деформационные ис-

пытания изучаемого оптического волокна при одновременной регистрации состояния фазы излучения по длине образца могут быть объектами дальнейших рассмотрений. Также немаловажным направлением дальнейших исследований может стать изучение интегрально-оптических схем и протекающих в них процессов. Метод, обладающий достаточно высоким пространственным разрешением и способностью регистрировать фазу обратно-рассеянного излучения, является полностью пригодным для такой задачи. Одним из физических эффектов, имеющих фазовую чувствительность, является пирозэффект, появляющийся в интегрально-оптических модуляторах, подверженных резкому нагреву после длительного охлаждения [16, 17]. Авторы предполагают, что применение данной исследовательской установки позволит на новом уровне исследовать физические механизмы в подобных волноводах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Раздел 2 выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края (проект 19-48-590018 p_a, № АААА-А20-120031690047-9); разделы 3, 4, 5 выполнены в рамках государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.И. Кривошееву за изготовление пассивных компонентов схемы и плодотворные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hartog A.H., Belal M., Clare M.A. // *Marine Technol. Society J.* 2018. V. 52. P. 58. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.52.5.7>
2. Spirin V.V., Lopez-Mercado C.A., Mégret P., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. // *Opt. Sensors.* 2021. V. 11772. P. 1177207. <https://doi.org/10.1117/12.2589112>
3. Markvyart A.A., Liokumovich L.B., Medvedev I.O., Ushakov N.A. // *J. Lightwave Technol.* 2021. V. 39. P. 282. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3024713>
4. Huan He, Zhiyong Zhao, Songnian Fu, Deming Liu, Ming Tang. // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. P. 3403. <https://doi.org/10.1364/OL.458100>
5. Liang Y., Wang Z., Lin S., Wang Y., Jiang J., Qiu Z., Liu Ch., Rao Y. // *Sci. China Inf. Sci.* 2022. V. 65. P. 192303. <https://doi.org/10.1007/s11432-021-3329-6>
6. Mohd Saiful Dzulkefly Zan, Ahmed Sabri Kadhim Almoosa, Mohd Faisal Ibrahim, Mohamed M. Elgaud, Abdulwahhab Essa Hamzah, Norhana Arsad, Mohd Hadri Hafiz Mokhtar, Ahmad Ashrif A. Bakar // *Opt. Fiber Technol.* 2022. V. 72. P. 102977. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102977>
7. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
8. Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Belokrylov M.E. // *Instrum. Exp. Tech.* 2022. V. 65. P. 687. <https://doi.org/10.1134/S0020441222050268>
9. Kwon Y.-S., Seo D.-C., Choi B.-H., Jeon M.Y., Kwon I.-B. // *Appl. Sci.* 2018. V. 8. P. 2051. <https://doi.org/10.3390/app8112051>
10. Wang Q., Zhao K., Badar M., Yi X., Lu P., Buric M., Mao Z., Chen K.P. // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 18471. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3197730>
11. Zhang Z., Fan X., He Z. // *J. Lightwave Technol.* 2019. V. 37. P. 4590. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2913284>
12. Zhao S., Cui J., Wu Z., Wang Z., Tan J. // *J. Lightwave Technol.* 2021. V. 39. P. 4101.
13. Ponomarev R.S., Konstantinov Y.A., Belokrylov M.E., Shevtsov D.I., Karnaukhkin P.V. // *Instrum. Exp. Tech.* V. 65. P. 787 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0020441222050190>
14. Yüksel K., Wuilpart M., Moeyaert V., Megret P. // In 11th International Conference on Transparent Optical Networks. 2009. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2009.5185111>
15. Zhao S., Cui J., Tan J. // *Sensors.* 2019. V. 19. P. 3660. <https://doi.org/10.3390/s19173660>
16. Karnaukhkin P.V., Konstantinov Y.A. // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. V. 64. P. 709. <https://doi.org/10.1134/S002044122104018>
17. Ponomarev R., Konstantinov Y., Belokrylov M., Lobach I., Shevtsov D. // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 9853. <https://doi.org/10.3390/app11219853>