

УДК 681.78

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО САМОСКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРА: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ¹ (обзор)

© 2023 г. А. Ю. Ткаченко^{а,*}, И. А. Лобач^а, С. И. Каблуков^а

^аИнститут автоматики и электрометрии СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

*e-mail tkachenko@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 21.01.2023 г.

После доработки 01.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Работа посвящена обзору достигнутых результатов в области когерентной оптической частотной рефлектометрии на основе источника перестраиваемого по частоте излучения нового типа — волоконного самосканирующего лазера. Было показано, что разработанный КОЧР может быть использован для задач характеристики оптических элементов, сенсорики, вибродальнометрии, газового анализа на длинах нескольких десятков метров с субмиллиметровым пространственным разрешением. Также обсуждаются перспективы развития этого направления.

DOI: 10.31857/S0032816223050257, EDN: ZWOXEM

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы многих распределенных волоконных систем основан на методах импульсной оптической рефлектометрии. В данных методах короткий лазерный импульс излучения вводится в тестируемое оптическое волокно. Величина временной задержки между моментом ввода импульса и временем прихода отклика на него пропорциональна координате вдоль оптического волокна, в которой произошел регистрируемый на фотоприемнике акт рассеяния/отражения. Пространственное разрешение в этом случае определяется длительностью зондирующего импульса и, как правило, составляет порядка 1 м. Уменьшение длительности импульса негативным образом сказывается на регистрируемом сигнале. Принципиально другим подходом в задаче распределенных измерений, позволяющим получить субмиллиметровое пространственное разрешение, является когерентная оптическая частотная рефлектометрия (КОЧР). Пространственное разрешение в этом случае обратно пропорционально диапазону перестройки зондирующего лазера и может достигать уровня десятков микрон. Принцип работы КОЧР основан на анализе сигнала

интерференции между исходным сигналом и рассеянным в волоконной линии при частотном сканировании зондирующего излучения перестраиваемого лазера [1]. Полученный при сканировании частоты интерференционный сигнал содержит информацию о величине и точном положении отражающих событий в волоконной сенсорной линии, которая далее может быть извлечена с помощью фурье-анализа. Результатом таких измерений является рефлектограмма — зависимость параметра рассеяния/отражения от временной задержки (или координаты). Основным перспективным применением КОЧР в сенсорных задачах является использование замороженных в волокно неоднородностей показателя преломления, для которых величина обратного рассеяния Рэлея оценивается примерно как -100 дБ/мм, при этом пространственное разрешение такой системы может достигать субмиллиметровых масштабов [2, 3].

КОЧР требует высококогерентного лазерного источника с перестройкой частоты. При этом использование фурье-анализа приводит к жестким требованиям на линейность перестройки частоты. Как правило, в качестве источника зондирующего излучения используются полупроводниковые перестраиваемые лазеры, для которых характерно наличие нелинейности при перестройке оптической частоты. В подавляющем большинстве статей и патентов, посвященных КОЧР, эта проблема решается с помощью дополнительных

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

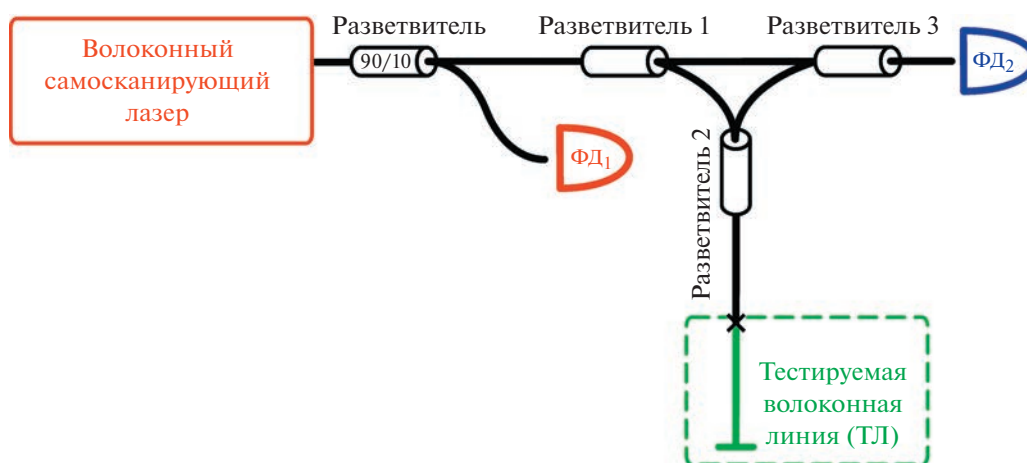


Рис. 1. Схема когерентного оптического частотного рефлектометра на основе самосканирующего волоконного лазера.

измерений перестройки частоты генерации лазера для последующей корректировки спектральных зависимостей. Альтернативой этому подходу является применение лазера, имеющего фиксированную частотную дискретность при его перестройке. В этом случае линейность перестройки в лазерах со ступенчатой перестройкой частоты достигается априори и не требует корректировки с помощью внешнего интерферометра. Одной из реализаций подобного источника является волоконный самосканирующий лазер (ВСЛ) [4]. Важной особенностью лазера является то, что перестройка оптической частоты происходит только за счет формирования динамических фильтров на основе решеток инверсной населенности [5] непосредственно в активной среде в процессе генерации лазера без применения каких-либо дополнительных внешних фильтров. В таких лазерах оптическая частота изменяется ступенчатым образом от импульса к импульсу на фиксированную величину, определяемую длиной резонатора.

Настоящая работа посвящена обзору достигнутых результатов в области КОЧР на основе ВСЛ и обсуждению перспектив развития этого направления.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема КОЧР представлена на рис. 1. Основным элементом схемы является иттербиевый ВСЛ (перестройка в области 1060–1080 нм со скоростью около 1 нм/с). Динамика интенсивности лазера состоит из высококогерентных (спектральная ширина линии не более 1 МГц) микросекундных импульсов. При этом оптическая частота излучения лазера изменяется между импульсами и составляет примерно 5.7 МГц. Это значение определяется длиной резонатора лазера и может быть изменено.

Излучение ВСЛ проходит через двухлучевой интерферометр Маха–Цендера, одно из плеч которого содержит тестируемую линию, и детектируется фотодетектором ФД₂. Конкретная реализация интерферометра Маха–Цендера зависит от величины отражения отражателей, содержащихся в тестируемой линии. Также небольшая часть излучения ВСЛ детектируется ФД₁ для нормировки интерференционного сигнала. Дополнительно в интерферометр Маха–Цендера можно добавить отрезок пассивного волокна для компенсации разности оптических путей в двух его плечах.

Для построения спектральных зависимостей необходимо провести процедуру поиска вершин импульсов в интерференционном и нормировочном сигналах и осуществить поимпульсную нормировку. Нормированная зависимость от номера импульса соответствует спектрограмме, поскольку для ВСЛ все импульсы равноудалены в частотной области. Далее, применяя быстрое преобразование Фурье, из спектрограммы мы рассчитываем рефлектограмму для тестируемой линии. Оцифровка и обработка сигналов может быть реализована как с помощью стандартных устройств (например, с использованием осциллографа и последующей постобработки сигнала на компьютере), так и с помощью специализированного аппаратно-программного модуля [6] с обработкой в режиме реального времени. В последнем случае аппаратная часть модуля была реализована на микроконтроллере STM32F303 со встроенным аналого-цифровым преобразователем, она работала на частоте дискретизации около 5 МГц и позволяла одновременно оцифровывать несколько аналоговых сигналов. Программная часть модуля проводила поиск вершин импульсов и нормировку, а также разбивку потока данных на отдельные измерения, соответствующие одиночным сканам.

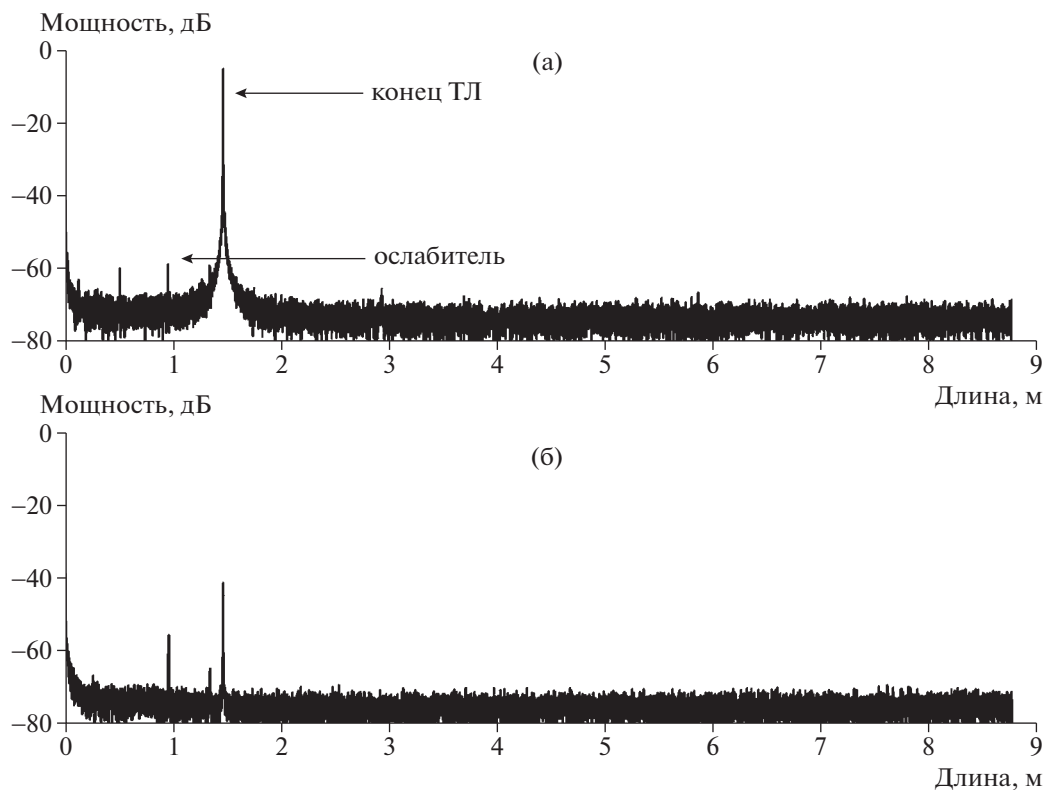


Рис. 2. Рефлектограмма линии, состоящей из регулируемого волоконного ослабителя и отрезка волокна с френелевским отражением на конце, при различных степенях ослабления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе [7] была представлена первая демонстрация схемы КОЧР на основе иттербиевого ВСЛ. Схема была опробована на тестируемой линии, которая состояла из регулируемого волоконного ослабителя и отрезка волокна с френелевским отражением на свободном выходном торце. В работе были представлены рефлектограммы линии, примеры которых показаны на рис. 2 при разной величине ослабления. При увеличении потерь на ослабителе увеличивалась амплитуда его пика, а амплитуда пика отражателя, находящегося в конце тестируемой линии, наоборот, уменьшалась. В первой работе была продемонстрирована возможность получения пространственной дискретизации в рефлектометре около 200 мкм при чувствительности примерно -79 дБ (или -86 дБ/мм) и длине тестовой линии примерно до 9 м.

Наибольший интерес для практического применения частотного рефлектометра представляют сенсорные задачи. Однако первые результаты были далеки от реализации сенсорных задач в тестируемой линии на обычных пассивных волокнах. Нужно было увеличивать сигнал рассеяния/отражения в тестируемой линии или увеличивать чувствительность рефлектометра. В работе

[8] для увеличения уровня сигнала была использована тестируемая линия, состоящая из массива нерезонансных волоконных брэгговских решеток (ВБР). Массив состоял из 28 ВБР, максимумы отражения которых (1092 нм) находились вне диапазона перестройки ВСЛ. Однако даже такие ВБР увеличивали сигнал рассеяния до необходимого уровня (см. рефлектограмму на рис. 3). Рефлектограмма состоит из множества пиков, каждый из которых соответствует своей ВБР.

Для демонстрации сенсорных задач одна из этих ВБР помещалась в термостат, управляемый при помощи термоконтроллера. Для измерения температуры необходимо сравнивать спектры ВБР в нагретом состоянии и при комнатной температуре. Для получения спектра отражения отдельной ВБР необходимо провести обратное преобразование Фурье от ее участка рефлектограммы. Однако нерезонансная ВБР не имеет четко выраженного пика отражения в диапазоне перестройки ВСЛ. По этой причине в экспериментах анализировалась корреляционная функция спектров отражения ВБР при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии. Рисунок 4 показывает смещение корреляционного узкого пика в область меньших частот при нагреве одной из ВБР с наклоном 1.83 ГГц/ $^{\circ}\text{C}$.

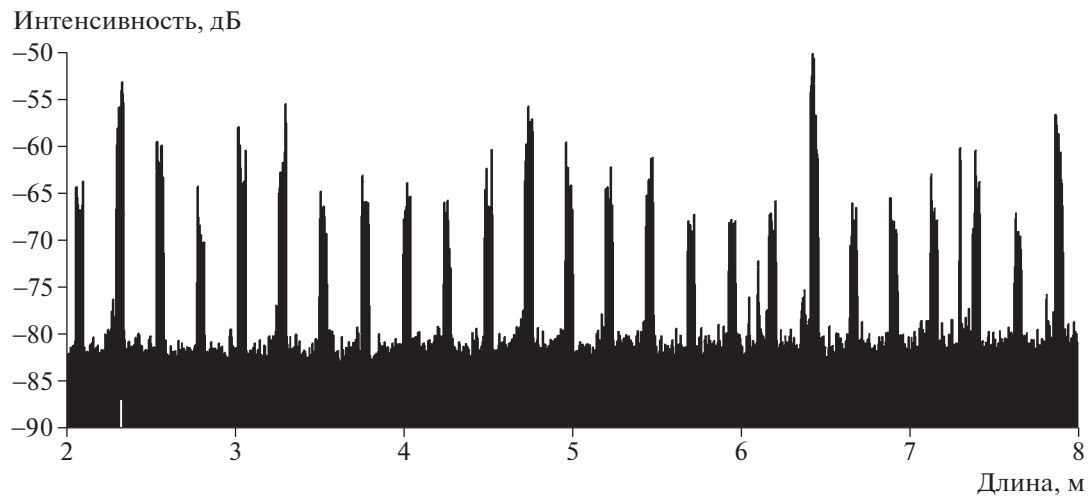


Рис. 3. Рефлектограмма сенсорной линии.

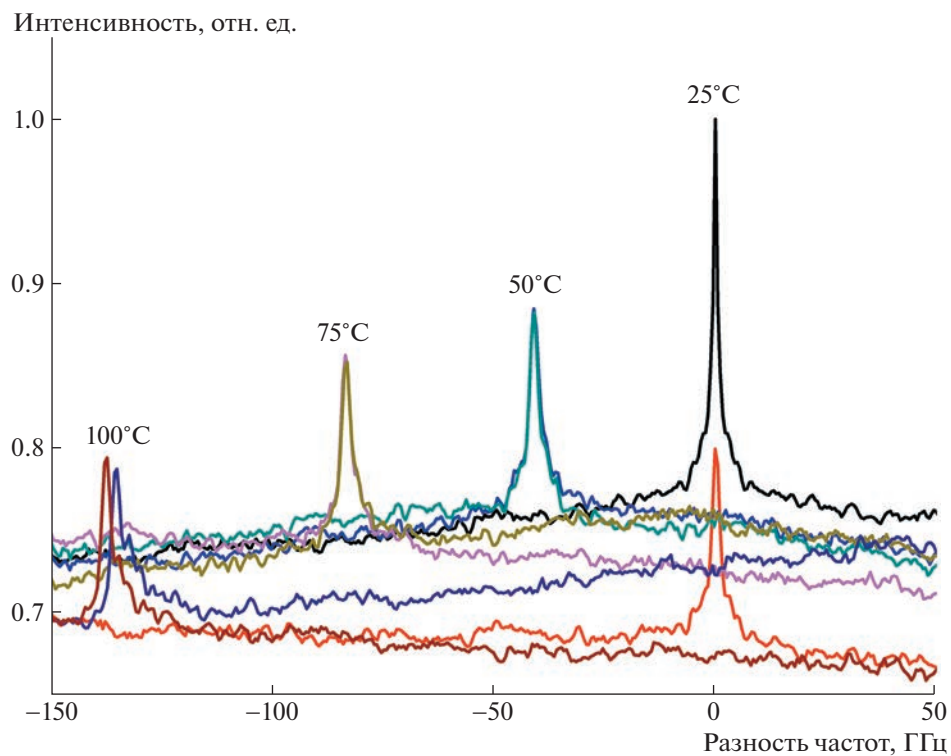


Рис. 4. Функции корреляции между спектрами отражения нерезонансной ВБР при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии.

В работе [9] авторы решали проблему увеличения чувствительности за счет оптимизации параметров интерферометра. Оптимизация заключалась в варьировании коэффициентов ветвления выходных ответвителей в схеме интерферометра Маха—Цендера. Основная идея измерения слабых отражений в тестируемой линии заключается в том, чтобы выровнять амплитуды интерфериру-

ющих сигналов на выходе интерферометра Маха—Цендера. На рис. 5 показаны экспериментальные зависимости амплитуды пика от величины эффективного коэффициента отражения в тестируемой линии для трех комбинаций выходных ответвителей.

Уровень шумов практически не зависел от условий экспериментов. Уровень чувствительно-

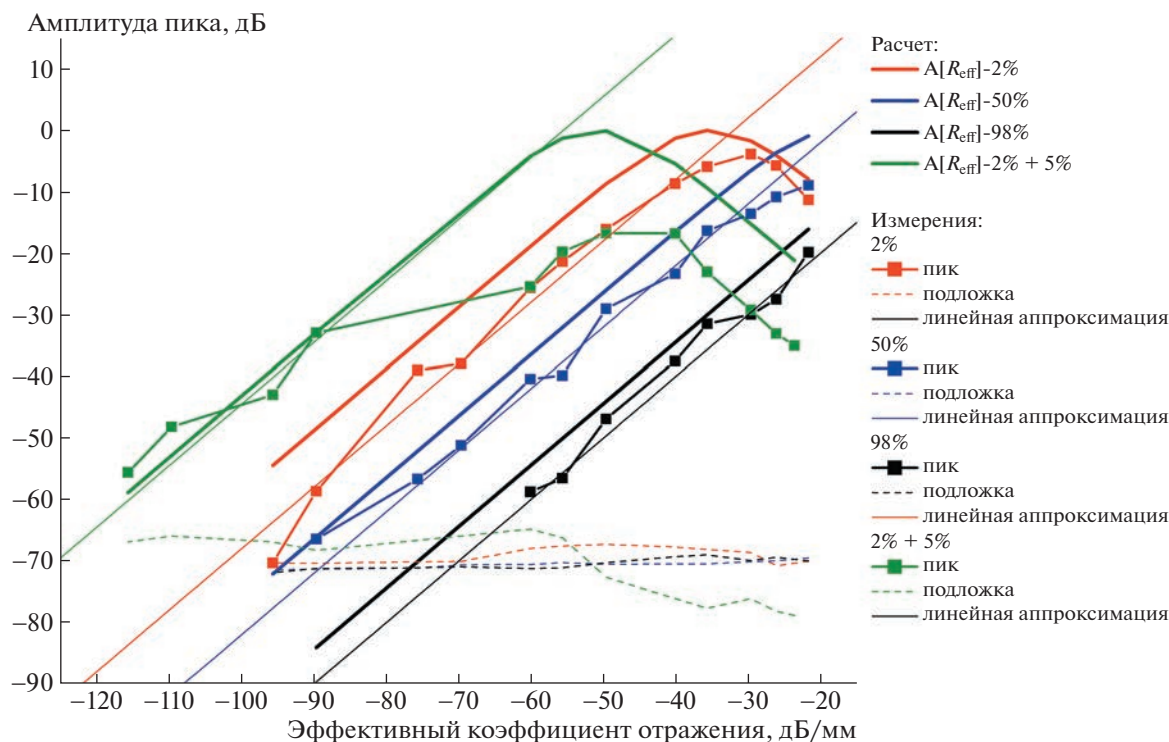


Рис. 5. Амплитуда пика и величина уровня шумового фона на рефлектограмме в зависимости от эффективного коэффициента отражения конечного отражателя в тестируемую линию.

сти для каждой конфигурации определялся по линейной аппроксимации экспериментальных данных к уровню шумов. Самый низкий уровень сигнала может быть измерен в конфигурации с выходным ответвителем 2%, он составил -96 дБ (-103 дБ/мм), что близко к уровню рассеяния Рэлея в оптическом волокне. Стоит отметить, что в этом случае сигналы большой интенсивности начнут искажаться. В дальнейшем для дополнительного уменьшения мощности в опорном плече с целью уменьшения разности уровней мощности между опорными и отраженными сигналами схема была еще изменена путем добавления в опорный канал ответвителя 95/5 таким образом, что только 5% излучения опорного канала участвовало в процессе интерференции [10]. Как результат, оптимизации чувствительность системы улучшилась до уровня примерно -120 дБ/мм, что позволяет измерять сигнал рассеяния Рэлея и проводить сенсорные измерения в обычном одномодовом волокне [10]. В работе [10] авторы продемонстрировали возможность измерения локальной (на масштабах нескольких сантиметров) температуры с помощью схемы КОЧР на основе ВСЛ и рэлеевского рассеяния света на замороженных неоднородностях в пассивном волокне. Для этого, аналогично работе [8], проводился корреляционный анализ локальных спектров отражения/рассеяния. Участок волокна длиной 4 см нагревался от комнатной

температуры до 90°C . На рис. 6 продемонстрировано увеличение смещения корреляционного пика с ростом температуры волокна.

Также стоит отметить, что в тестируемую линию может включаться не только оптическое волокно, но и другие среды (например, участок воздушной трассы). Несложно понять, что наличие какого-либо отражателя в линии приводит к появлению пика на рефлектограмме. Однако оказывается, что КОЧР позволяет измерять мелкомасштабные вибрации в воздушном канале [11]. В этой работе используется схожая схема установки, однако в плечо интерферометра, содержащее тестовую линию, добавлен коллиматор для вывода зондирующего излучения из волокна и приема части его обратно после рассеяния на тестируемой мишени. В качестве мишени использовалась черная анодированная полированная алюминиевая поверхность стандартной юстировочной подвижки, а длина трассы модулировалась при изменении напряжения пьезоэлемента, на котором было размещено поворотное зеркало. В результате были получены рефлектограммы, измеренные при фиксированной амплитуде колебаний зеркала для нескольких частот модуляции (2, 400, 1400 и 5000 Гц). При отсутствии модуляции положения поворотного зеркала на рефлектограмме наблюдались пики, соответствующие положению как мишени, так и поворотного зеркала. При добав-

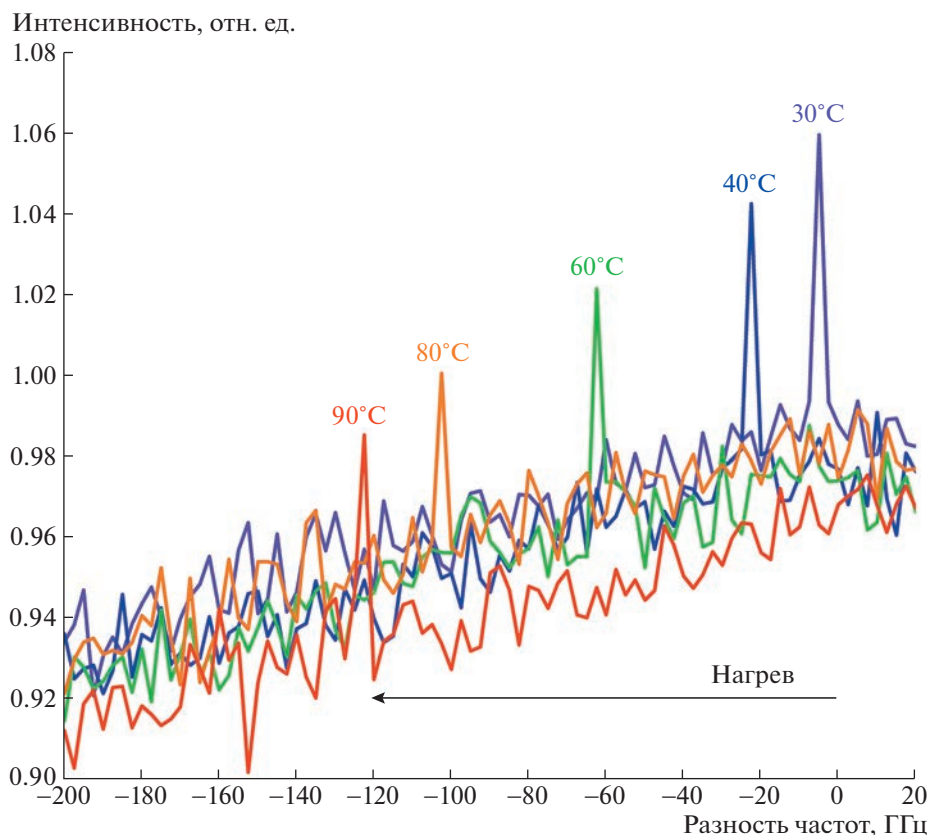


Рис. 6. Функции корреляции для разных температур нагретого участка волокна длиной 4 см.

лении вибраций вблизи пика, соответствующего мишени, появлялись симметрично расположенные пики. В экспериментах была продемонстрирована возможность измерения вибраций в диапазоне частот от 2 Гц до 5 кГц с амплитудой от примерно 5 нм на расстоянии до примерно 13 м. При этом максимальная измеряемая частота колебаний ограничена нестабильностью параметров самосканирования лазера во временной области, она оценивается примерно как 7.5 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был продемонстрирован КОЧР на основе ВСЛ, который позволяет измерять продольное распределение отражателей в тестируемой линии. Максимальная длина тестируемой линии в экспериментах составила около 10 м, что определяется дискретом частоты при ее перестройке. Потенциально это значение можно увеличить при пропорциональном увеличении длины резонатора ВСЛ. Например, в работе [12] показан ВСЛ с частотной дискретностью около 1 МГц, что соответствует максимальной длине тестируемой линии примерно 50 м в схеме КОЧР. Дальнейшее увеличение дальности для предложенного подхода представляется затруднительным.

Пространственное разрешение определяется спектральным диапазоном перестройки ВСЛ. Экспериментально показано, что 20 нм перестройки в области 1 мкм соответствуют разрешению около 0.02 мм. На данный момент существенного увеличения диапазона перестройки в лазерах такого типа пока не получено.

В зависимости от характеристик используемого интерферометра Маха—Цендера с помощью КОЧР можно детектировать отражатели с коэффициентами отражения на уровне -120 дБ/мм. Это означает, что могут быть измерены отражения, соответствующие замороженным в волокно неоднородностям показателя преломления (рассеяние Рэлея). Кроме того, КОЧР позволяет проводить спектральный анализ спектров отражения отдельных элементов, составляющих тестируемую линию. Это свойство позволяет использовать КОЧР в качестве устройства опроса в сенсорных задачах. Однако стоит отметить, что оптимизация интерферометра Маха—Цендера для измерения малых коэффициентов отражения приводит к нелинейному и неоднозначному отклику измерительной системы для больших коэффициентов отражения (см. красную кривую на рис. 5). Это означает, что оптимизация интерферометра Маха—Цендера должна соответствовать

параметрам тестируемой линии. Для увеличения динамического диапазона измерения коэффициентов отражения (который на данный момент времени составляет примерно 70 дБ) необходимо понижать уровень шумов в рефлектограмме (см. горизонтальные линии на рис. 5). Одним из способов уменьшения шумов является накопление сигнала с последующим усреднением. Этого можно добиться с помощью усреднения по набору последовательно снятых рефлектограмм или накопления сигнала в каждой точке спектра. Для реализации первого подхода необходима высокая стабильность последовательных сканов ВСЛ. Характерные флуктуации границ сканирования ВСЛ составляют 1 нм и 0.1 нм для стартовой и конечной длин волны [13]. Использование методов стабилизации с помощью стандартных ВБР (с шириной спектра отражения около 0.1 нм) позволяет уменьшить эти значения до 0.01 нм. Можно предположить, что использование селекторов с более узким спектром отражения позволит значительно уменьшить эти флуктуации. Однако для этих целей требуется применение отражателей другого типа, так как изготовление узкополосных ВБР (с шириной спектра отражения менее 0.01 нм) представляется трудоемким.

Альтернативой подходу стабилизации является накопление сигнала. Накопление сигнала в КОЧР происходит только на временах генерации каждого импульса. В КОЧР использовался ВСЛ с генерацией микросекундных импульсов. В действительности, при используемых частотах оцифровки сигнала (около 5 МГц) каждый импульс дает только примерно 5 точек измерения, что мало для эффективного уменьшения шумов. В качестве перспективного перестраиваемого источника может быть использован квазинепрерывный ВСЛ [14], генерирующий длинные миллисекундные импульсы и работающий в квазинепрерывном режиме сканирования. В этом случае ожидается увеличение числа точек на три порядка, что потенциально соответствует уменьшению уровня шума на $20 \lg 10^{3/2} = 15$ дБ. Увеличения отношения сигнал/шум также можно добиться увеличением мощности лазера. Однако максимальная вводимая мощность ограничена появлением нелинейных эффектов в волокне. При использовании высококогерентного излучения наименьший порог имеет вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна (1 Вт для длины волокна 10 м). В рассмотренных экспериментах пиковая мощность лазера составляла примерно 0.3 Вт. Стоит также отметить, что все элементы КОЧР (в том числе и тестируемая линия) в экспериментах обладали свойством сохранения поляризации, а измерения проводились для одной поляризационной моды. В случае использования тестируемой линии на основе обычного оптического волокна могут возникать так называемые эффекты замирания сиг-

нала в рефлектограмме из-за отсутствия интерференции для скрещенных поляризационных состояний на выходе интерферометра Маха—Цендера. Одним из направлений развития КОЧР на основе ВСЛ представляется измерение сигнала интерференции в двух поляризациях, аналогично работе [2]. Для этого необходимо проводить как зондирование, так и детектирование двух поляризационных состояний. Это позволит расширить область применения разработанного КОЧР на тестируемой линии на основе стандартных волокон. Дальнейшим расширением области применения КОЧР является проведение различных квазираспределенных измерений. В частности, в работе [15] рассматривается вопрос измерения вибрационных характеристик от нескольких вибрирующих отражателей. Экспериментально было показано, что схема позволяет регистрировать положение и вибрации сразу нескольких отражателей в линии методом КОЧР. Стоит отметить, что сигнал, отраженный от любого отражателя, также содержит в себе информацию об оптической среде, через которую прошло зондирующее излучение. В частности, в работе [16] было показано, что спектральный анализ коэффициента отражения позволяет определить газовую среду в тестируемой линии по пикам поглощения, попадающим в область перестройки ВСЛ. Потенциально это свойство может быть применено для квазираспределенного измерения газовых сред. Таким образом, была продемонстрирована работа КОЧР на основе источника нового типа — ВСЛ. Было показано, что разработанный КОЧР может быть использован для задач характеристики оптических элементов, сенсорики, вибродалномерии, газового анализа на длинах в несколько десятков метров с субмиллиметровым пространственным разрешением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122031600174-5 с использованием оборудования центра коллективного пользования “Спектроскопия высокого разрешения газов и конденсированных сред” ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *MacDonald R.I.* // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 1840. <https://doi.org/10.1364/AO.20.001840>
2. *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>
3. *Loranger S., Gagné M., Lambin-Jezzi V., Kashyap R.* // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 11177. <https://doi.org/10.1038/srep11177>

4. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. // Laser Phys. Lett. 2014. V. 11. P. 045103. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/4/045103>
5. Poddubrovskii N.R., Drobyshev R.V., Lobach I.A., Kablukov S.I. // Photonics. 2022. V. 9. P. 613. <https://doi.org/10.3390/photonics9090613>
6. Смолянинов Н.Н., Ткаченко А.Ю., Скворцов М.И., Лобач И.А., Каблуков С.И. // ПТЭ. 2021. № 2. С. 76.
7. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И. // КЭ. 2019. Т. 49. С. 1121. <https://doi.org/10.1070/QEL17165>
8. Ткаченко А.Ю., Смолянинов Н.Н., Скворцов М.И., Лобач И.А., Каблуков С.И. // ПТЭ. 2020. Т. 63. № 4. С. 536. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040333>
9. Krivosheina D.A., Tkachenko A.Yu., Lobach I.A., Kablukov S.I. // In IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022. P. 352. <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855153>
10. Кривошеина Д.А., Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И. // КЭ. 2022. Т. 52. С. 994.
11. Volikova A.M., Lobach I.A., Kablukov S.I. // Opt. Express. 2022. V. 30. P. 22025. <https://doi.org/10.1364/OE.454144>
12. Lobach I.A., Kablukov S.I., Melkumov M.A., Khopin V.F., Babin S.A., Dianov E.M. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 24833. <https://doi.org/10.1364/OE.23.024833>
13. Tkachenko A.Yu., Lobach I.A., Podivilov E.V., Kablukov S.I. // Quantum Electron. 2018. V. 48. P. 1132. <https://doi.org/10.1070/QEL16854>
14. Drobyshev R.V., Poddubrovskii N.R., Lobach I.A., Kablukov S.I. // Laser Phys. Lett. 2021. V. 18. P. 085102. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac0449>
15. Воликова А.М., Лобач И.А., Каблуков С.И. // В материалах 10-го Международного семинара по волоконным лазерам. 2022. С. 128.
16. Бударных А.Е., Каблуков С.И., Лобач И.А. // В материалах 10-го Международного семинара по волоконным лазерам. 2022. С. 172.