

Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты

А.Ю.Ткаченко, И.А.Лобач, С.И.Каблуков

Представлены первые результаты экспериментального исследования когерентного оптического частотного рефлектометра (КОЧР) на основе простого одночастотного волоконного лазера с самосканированием частоты. Такой лазер генерирует микросекундные импульсы, а частота его излучения линейно изменяется с номером импульса без использования каких-либо активно перестраиваемых элементов. Кроме того, генерация каждого импульса происходит только на одной продольной моде с шириной линии менее 1 МГц. Для такого лазера характерна высокая линейность перестройки частоты, что позволяет измерять рефлектограммы без дополнительной спектральной коррекции. В представленном КОЧР показана возможность достижения пространственной дискретизации ~ 200 мкм и чувствительности по коэффициенту отражения приблизительно до -80 дБ при длине тестовой линии ~ 9 м.

Ключевые слова: когерентный оптический частотный рефлектометр, самосканирующий волоконный лазер, перестраиваемый лазер, волоконный датчик, рефлектометрия.

1. Введение

Оптическая рефлектометрия является ключевой технологией как для диагностики оптических систем, так и для распределенных сенсорных измерений. В последнем случае используется зависимость параметров излучения (например, интенсивности или оптической частоты), рассеянного вдоль оптического волокна, от внешних физических воздействий (например, от температуры или механических деформаций) [1]. Чаще всего в волоконных распределенных сенсорных системах используется техника временной рефлектометрии. Работа рефлектометра основана на зондировании волоконной линии короткими импульсами излучения. Зондирующее излучение, отраженное от дефектов или рассеянное на неоднородностях показателя преломления волокна (рассеяние Рэлея), детектируется и затем анализируется по принципу эха, в соответствии с которым местоположение отражателя/рассеивателя линейно связано с временем задержки между входным и отраженным сигналами. Пространственное разрешение рефлектометра в этом случае определяется длительностью импульса и может достигать ~ 1 м.

Однако для некоторых применений (например, для мониторинга конструкций самолетов) требуется гораздо лучшее пространственное разрешение. Самым простым способом его улучшения является уменьшение длительности зондирующего импульса, которое при сохранении пиковой мощности приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и, как следствие, к снижению чувствительно-

сти рефлектометра к измеряемой мощности. Для решения этой проблемы необходимо увеличивать пиковую мощность зондирующего импульса. Однако она ограничена нелинейными процессами в волокне (например, вынужденным комбинационным рассеянием) [2], которые искажают измеряемый сигнал. Другим подходом к уменьшению уровня шума является применение однофотонных счетчиков. Например, в работе [3] с помощью счетчика единичных фотонов было получено пространственное разрешение порядка нескольких сантиметров на линии длиной 50 км. Кроме того, для улучшения пространственного разрешения применяются также специальные методы обработки обратного рассеянного сигнала. Методика кодирования/декодирования с различными типами кодов [4, 5] (например, симплекс-кодирование) позволяет увеличить отношение сигнал/шум без изменения длительности импульса. В этом случае зондирующий сигнал состоит из закодированной последовательности импульсов стандартной длительности. Или же, напротив, техника кодирования позволяет уменьшить пространственное разрешение при сохранении отношения сигнал/шум. Техника деконволюции сигнала, учитывающая форму импульса, также помогает улучшить пространственное разрешение [6].

Принципиально иным подходом к увеличению пространственного разрешения является когерентная оптическая рефлектометрия в частотной области (для краткости – оптическая частотная рефлектометрия) [7]. Принцип ее работы отличен от принципа эха и основан на спектральном анализе интерференционного сигнала, возникающего при смешении зондирующего и рассеянного излучения. В этом случае пространственная координата отражателей/рассеивателей пропорциональна частотной координате максимумов в фурье-спектре интерференционного сигнала, измеренного в процессе перестройки оптической частоты. Для когерентных оптических частотных рефлектометров (КОЧР) используются перестраиваемые источники излучения с большой длиной когерентности. Пространственное разрешение КОЧР ограничено диапа-

А.Ю.Ткаченко. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: alinka.tkachenko@yandex.ru

И.А.Лобач, С.И.Каблуков. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 21 октября 2019 г.

зоном перестройки длины волны зондирующего лазера. В качестве зондирующих уже применялись различные виды лазеров. Например, полупроводниковый лазер, перестраиваемый с помощью тока [8], кольцевой Nd:YAG-лазер, перестраиваемый с помощью температуры [9] или пьезоэлементов [10]. Недостатком этих источников является малая длина когерентности и нелинейность частотной перестройки. Для обработки сигналов с помощью преобразования Фурье требуется строгая линейность перестройки оптической частоты. Обычно для компенсации нелинейности перестройки используется триггерный интерферометр [11]. По сути, интерферометр необходим для измерения мгновенной оптической частоты. В результате можно получить сигналы отражения через регулярные интервалы перестройки частоты.

Недостатки, связанные с ограниченной длиной когерентности и нелинейностью перестройки, могут быть устранены с помощью лазерного диода с внешним резонатором на основе волоконной брэгговской решетки [12]. В предложенной схеме удалось получить линейную перестройку частоты излучения в диапазоне 200 МГц с шириной линии 10 кГц. В результате пространственное разрешение в такой системе улучшилось до 2 м при длине линии 115 м. Для коммерчески доступных КОЧР пространственное разрешение составляет уже 20 мкм при длине волоконной линии 20 м [13]. Более высокое пространственное разрешение продемонстрировано в экспериментальных образцах. В случае широко перестраиваемых лазерных источников дальнейшее улучшение разрешения ограничивается дисперсионными характеристиками тестируемой среды. Пространственное разрешение ~ 5 мкм в волноводах на кристалле InP было экспериментально продемонстрировано в [14], когда были учтены дисперсионные характеристики волновода. Максимальная длина измеряемой линии для КОЧР обычно ограничена длиной когерентности источника. Метод компенсации фазовых шумов [15] позволяет увеличить длину линии до 10 км, однако максимальная длина линии в реальных устройствах ограничена частотной дискретизацией зондирующего излучения.

В настоящей работе предлагается применение нового типа перестраиваемого лазера с самосканированием частоты [16] в качестве источника зондирующего излучения для достижения строгой дискретности при перестройке частоты. Оптическая перестройка частоты происходит за

счет внутренних процессов, происходящих в активном волокне [16], без использования каких-либо перестраиваемых элементов. Важной особенностью лазера является генерация последовательности микросекундных когерентных импульсов со спектральной шириной не более 1 МГц и строгой дискретностью оптической частоты. Последний факт позволяет применять такой лазер без использования триггерного интерферометра для компенсации нелинейности перестройки частоты.

2. Эксперимент

Схема КОЧР приведена на рис.1. Ключевым элементом схемы является волоконный лазер с самосканированием частоты. В конструкции лазера использованы компоненты и волокна, сохраняющие поляризацию. Резонатор лазера образован широкополосным высокоотражающим волоконным кольцевым зеркалом на основе поляризирующего ответвителя 50/50 и сколотым под прямым углом волокном с френелевским отражением. В качестве усиливающей среды используется волокно Nuferrn PM-YDF-5/130 длиной 3 м с двойной оболочкой, легированное ионами иттербия. Усиливающая среда накачивалась через объединитель накачки излучением многомодового лазерного диода с длиной волны вблизи 975 нм и мощностью до 9 Вт. Порт 80% ответвителя 20/80 совместно с изолятором служит для вывода лазерного излучения из резонатора и его дальнейшего использования. В результате эффективный коэффициент отражения выходного зеркала в виде скола волокна составил $\sim 0.2\%$. Далее 10% всей выходной мощности излучения отводилось через ответвитель 10/90 для формирования опорного канала. При мощности накачки 2 Вт лазер работает в режиме самосканирования длины волны в области 1060–1080 нм со скоростью ~ 1 нм/с (см. рис.1). Динамика интенсивности лазера (аналогичная динамике в работе [16]) состоит из периодических микросекундных одночастотных импульсов (рис.2,а) со спектральной шириной не более ~ 1 МГц. Отметим, что это оценка, а не точное значение ширины линии, поскольку она связана с небольшим изменением оптической частоты за время генерации одного импульса (описывает так называемый частотный чирп) и сделана с помощью техники гетеродинамирования. Ожидается, что реальная мгновенная ширина линии меньше, чем величина частотного чирпа. Даже в этом случае длину когерент-

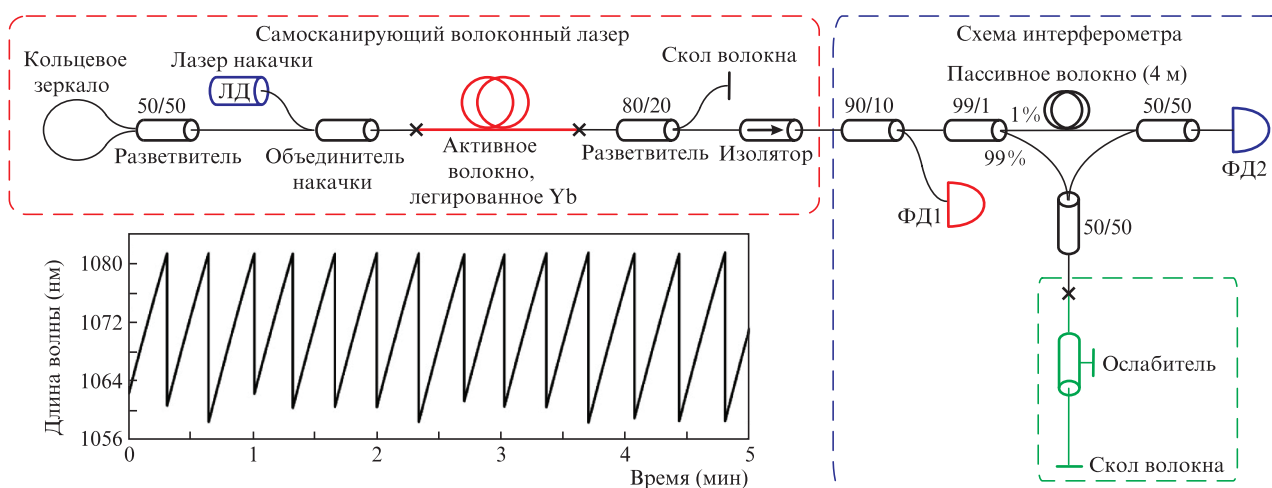


Рис.1. Схема КОЧР на основе волоконного лазера с самосканированием частоты и (на вставке) характерная динамика спектра его излучения.

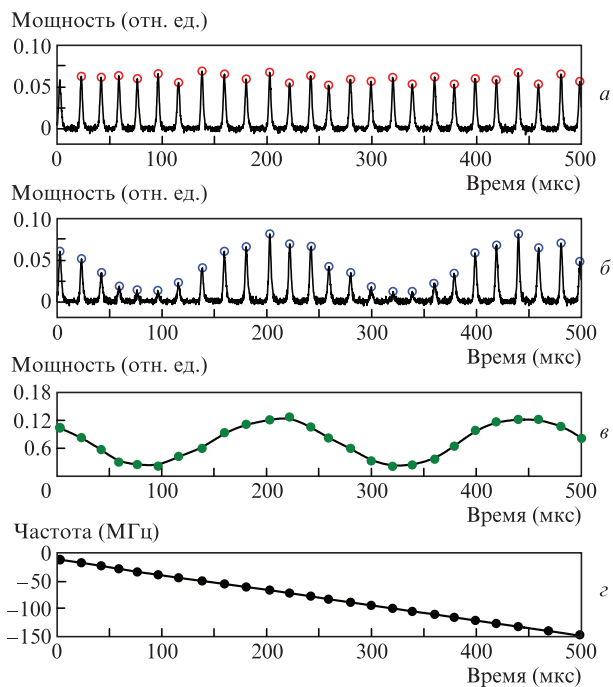


Рис.2. Динамика интенсивности лазерных импульсов на входе (а) и выходе (б) рефлектометра, а также огибающая сигнала интерференции, полученная при поимпульсном делении выходного (б) и входного (а), сигналов (в), и характерная динамика уменьшения оптической частоты лазера (г).

ности излучения лазера можно оценить примерно в 200 м. Частота излучения лазера изменяется между импульсами на величину одного межмодового интервала резонатора лазера и составляет ~ 5.5 МГц.

Излучение лазера с самосканированием частоты мощностью 25 мВт пропускается через интерферометр Маха–Цендера, одно из плеч которого содержит тестируемую волоконную линию (ТВЛ) (внутренний прямоугольник в правой части схемы на рис.1). Следует отметить, что поскольку вся схема реализована на волокнах и компонентах с сохранением поляризации, нам не требовалось дополнительно подстраивать поляризацию сигналов, что было необходимо в работе [12]. Интерферометр образован тремя волоконными ответвителями, образующими опорный и измерительный каналы. Первый ответвитель (99/1) делит лазерное излучение между измерительным и опорным каналами в соответствующей пропорции. Кусок пассивного волокна длиной 4 м добавлен в опорный канал для выравнивания оптических длин двух плеч, поскольку начало тестируемой линии соответствует точке, при отражении от которой длины плеч формируемого интерферометра оказываются равными. В качестве тестируемой волоконной линии использовалась система, состоящая из волоконного ослабителя и куска волокна, длина которого варьировалась в ходе экспериментов. Со свободной стороны это волокно скалывалось под прямым углом для формирования френелевского отражения. При изменении длины волокна и степени ослабления варьировались положение отражателя и величина эффективного коэффициента отражения соответственно. Для контроля степени ослабления дополнительно измерялась полная мощность со стороны свободного конца тестируемой линии. Сигналы на входе и выходе интерферометра регистрировались с помощью двух быстрых фотодетекторов (ФД1 и ФД2 на рис.1 соответственно) с по-

лосой пропускания 1 ГГц (Thorlabs, DET01CFC) и оцифровывались с помощью осциллографа (LeCroy, WavePro 725Zi-A) во временном окне длительностью 2 с с частотой дискретизации 5 МГц. При такой частоте дискретизации за время, равное длительности каждого импульса, регистрировалось 30 точек, что позволяет восстановить его форму.

Излучение, проходящее через интерферометр, представляет собой импульсы с изменяющимися амплитудами, которые зависят от результата интерференции и изменяются при перестройке оптической частоты лазера. Период и величина амплитудной модуляции содержат информацию о положении отражателей в ТВЛ и интенсивности отраженного ими излучения соответственно. В случае, когда есть только один отражатель в конце ТВЛ, огибающая принимает вид гармонической функции (рис.2,б). Для устранения влияния флуктуаций мощности входного излучения было проведено поимпульсное нормирование выходного интерференционного сигнала на опорный входной. В процессе нормировки осуществлялся поиск пиковых значений для каждого импульса в опорном сигнале, а затем для этих моментов времени вычислялось отношение интегральных мощностей в интерференционном и опорном сигналах по семи ближайшим точкам (кружки на рис.2,а и б для опорного и интерференционного сигналов соответственно). По сути, для каждого импульса вычислялась его энергия, а затем энергия импульса в сигнале интерференции нормировалась на соответствующую энергию импульса в опорном сигнале (рис.2,в). Для используемого лазера с самосканированием частоты один импульс во временной области соответствует одной определенной оптической частоте в спектральной области. Все импульсы являются эквидистантными в частотной области, поскольку оптическая частота изменяется между импульсами на один интервал межмодовых биений $\delta\nu \approx 5.5$ МГц (рис.2,г). В результате описанной процедуры была построена зависимость нормированной амплитуды сигнала интерференции от относительного номера импульса i . Относительная частота восстанавливалась простым умножением номера импульса на частотный межмодовый интервал: $\nu = \delta\nu i$. Для получения рефлектограммы – продольного распределения отражателей вдоль исследуемой линии – к зависимости нормированного сигнала интерференции от относительной частоты ν применялось быстрое преобразование Фурье. Физический смысл оси абсцисс в этом случае соответствует временной задержке между сигналами в опорном и измерительном каналах. Переход от времени к координатам ТВЛ осуществляется простым умножением его на скорость распространения сигнала в оптическом волокне. Максимальная длина линии в таких системах ограничена частотой дискретности между соседними импульсами. Ее возникновение связано с проявлением эффекта стробирования, когда шаг оцифровки становится больше частоты модуляции оцифровываемого сигнала, растущей с увеличением разности плеч интерферометра. Максимальная длина оценивается как $L_{\max} = c/(2n\delta\nu) = 8.7$ м, где n – показатель преломления оптического волокна, c – скорость света.

В первом эксперименте измерялись рефлектограммы при различных положениях ослабителя, вставленного в тестируемую линию. На рис.3 приведены примеры рефлектограмм для трех положений ослабителя, которые получены при средней мощности на выходе из свободного конца ТВЛ 25 мВт, 530 мкВт и 70 мкВт.

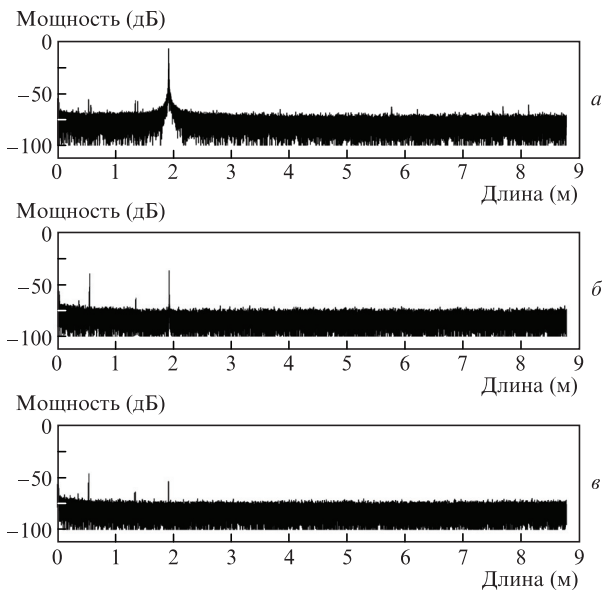


Рис.3. Рефлектограммы ТВЛ длиной 1.92 м для различных степеней ослабления ослабителя на один проход: 0 (а), -16.7 (б) и -25.5 дБ (в).

На всех рефлектограммах присутствует интенсивный пик, соответствующий отражению от выходного скола волокна. При этом амплитуда пика уменьшается с увеличением потерь в ослабителе. В случае, когда ослабитель полностью закрыт, т.е. потери максимальны, пик, соответствующий отражению от скола, не наблюдается, поскольку становится меньше уровня шумов. Эффективный коэффициент отражения от прямого скола волокна, может быть оценен с учетом потерь, вызванных ослабителем, на основе измерений излучения, выходящего со стороны свободного конца ТВЛ. Мощности прошедшего и отраженного излучения оцениваются как $P_{trans} = P_0 a (1 - R)$ и $P_{ref} = P_0 a^2 R$ соответственно, где P_0 – мощность на входе в ТВЛ; a – потери на ослабителе; R – коэффициент отражения от выходного торца волокна. Таким образом, эффективный коэффициент отражения квадратично зависит от измеряемой со стороны свободного конца ТВЛ мощности излучения:

$$R_{eff} = a^2 R = \frac{R P_{trans}^2}{[(1 - R) P_0]^2}. \tag{1}$$

Зависимость амплитуды компоненты разложения Фурье, соответствующей отражению от выходного торца ТВЛ, от измеренного по выходной мощности и рассчитанного на основании выражения (1) эффективного коэффициента отражения $10 \lg R_{eff}$ показана на рис.4. Ее аппроксимация представляет собой линейную зависимость с единичным наклоном. При этом пересечение линейной аппроксимации с уровнем шумов дает нам оценку минимальной измеряемой величины отражения в ТВЛ примерно -79 дБ.

В следующей серии экспериментов измерялись рефлектограммы при открытом состоянии ослабителя (0 дБ при 25 мВт на выходе ТВЛ) и при разных длинах волокна в тестируемой линии. На рис.5 приведены рефлектограммы для ТВЛ длиной 3.6, 7.1 и 9.8 м.

3. Обсуждение результатов

В рефлектограммах, представленных на рис.3 и 5, кроме основного пика, соответствующего отражению от вы-

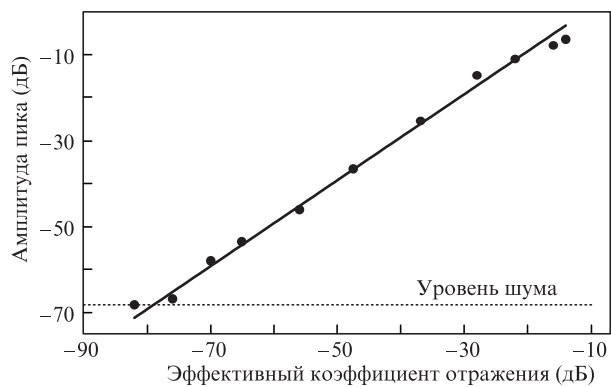


Рис.4. Зависимость амплитуды пика (пик в точке 1.92 м на рис.3) от эффективного коэффициента отражения ТВЛ, вычисленного по формуле (1).

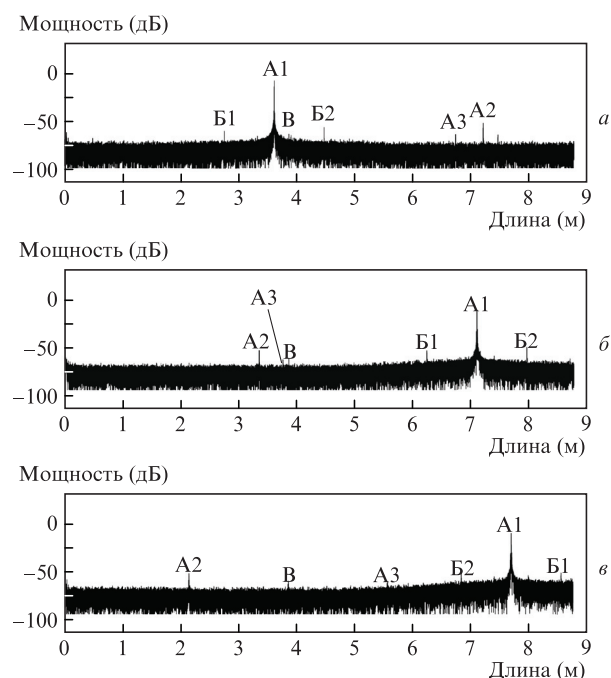


Рис.5. Рефлектограммы ТВЛ длиной 3.6 (а), 7.1 (б) и 9.8 м (в) с открытым ослабителем.

ходного торца ТВЛ, наблюдается множество побочных пиков. Детальный анализ измеренных рефлектограмм позволяет провести их классификацию. Для удобства описания разобьем пики на группы: А, Б и В. Пики группы А возникают из-за отражения от выходного торца, но только положение основного пика А1 соответствует длине ТВЛ. Точнее говоря, его положение согласуется с относительной разностью плеч интерферометра, поэтому в начале экспериментов выравнивались плечи в интерферометре без тестовой линии. Для иллюстрации работы рефлектометра в случае превышения длиной ТВЛ максимальной рабочей длины рефлектометра, определяемой частотным дискретом, $L_{max} = 8.7$ м (рис.5,в). В этом случае положение пика А1 на рефлектограмме ($L_{meas} = 7.6$ м) не согласуется с реальным положением отражателя ($L_{real} = 9.8$ м). Это соответствует ситуации, когда частота оцифровки сигнала меньше частоты измеряемой модуляции. Для малых превышений реальной измеряемой длины величины L_{max} ($L_{max} < L_{real} < 2L_{max}$) в соответствии со свойствами быстрого преобразования Фурье положение на рефлектограмме определяется выражением

$$L_{\text{meas}} = 2L_{\text{max}} - L_{\text{real}} \quad (2)$$

Положения двух других пиков группы А (А2 и А3), имеющих на рис.5 меньшую амплитуду, можно отнести к высшим (вторая и третья) гармоникам от основного пика А1. В большинстве случаев положения этих пиков выходят за пределы максимальной длины измерения, и тогда абсциссы пиков на рефлектограмме определяются выражением (2). Эти сигналы свидетельствуют об отличии сигнала интерференции от чистой гармонической функции, справедливой для интерферометра Маха–Цендера, которое можно связать с небольшой нелинейностью чувствительности фотоприемников, проявляющейся при измерении амплитуды сигналов.

Помимо этих сигналов, в рефлектограмме наблюдаются паразитные пики, не связанные с реальными отражениями излучения в ТВЛ. Также стоит отметить, что амплитуда паразитных пиков на 30–40 дБ меньше, чем амплитуда основного пика А1. Два пика группы Б симметрично отстоят от основного пика отражения на 0.86 м (пики Б1 и Б2). Эти пики можно связать с частотной модуляцией исходного сигнала лазера. Пик на длине 0.86 м наблюдался также в фурье-спектре опорного сигнала. Можно предположить, что в резонаторе лазера присутствует паразитный вложенный интерферометр, происхождение которого не было установлено. В группу В входит один пик (находится в точке 3.85 м), положение которого не зависит от условий эксперимента. По причине постоянства положения пиков этого типа, его можно связать с регулярными электрическими наводками в схеме измерения. Нужно отметить, что подобные паразитные пики, связанные с электрическими и оптическими сигналами, также наблюдались в рефлектограммах других работ, например в [12]. Для корректной работы частотного рефлектометра необходимо предпринять меры по борьбе с подобными наводками, а именно: исключить электрические внешние наводки в схеме измерения, обеспечить линейный режим использования фотоприемников, исключить какие-либо паразитные отражения как в лазере, так и в измерительном интерферометре. Согласно оценке, паразитные отражения не должны превышать чувствительности КОЧР, т. е. –90 дБ. В частности отметим, что стандартные APC/FC волоконные коннекторы не могут обеспечить такой уровень обратного отражения. Особое внимание необходимо уделять уровню обратного отражения элементов во всей системе – ответвителей, изоляторов, мест сварки.

Отметим также, что не все дополнительные пики в рефлектограммах были паразитными. Когда степень ослабления ослабителя была значительной (см., напр., рис.3,б), на рефлектограмме появлялся дополнительный пик, соответствующий положению ослабителя в линии (пик на 0.54 м на рис.3,б) с амплитудой компоненты Фурье –40...–50 дБ. Этот результат можно связать с отражениями, возникающими в самом ослабителе при увеличении потерь в нем. Исходя из зависимости, представленной на рис.4, можно оценить коэффициент отражения от ослабителя как –50...–60 дБ, что согласуется с его паспортными данными (–54 дБ). Этот пик практически отсутствует в случае, когда ослабитель находится в полностью открытом положении (см. рис.3,а).

Пространственная дискретизация δl для сигнала составила ~ 200 мкм, что определяется диапазоном перестройки $\Delta\nu$ частоты лазера: $\delta l = c/(2n\Delta\nu)$. При измере-

нии сигнала в течение 2 с диапазон перестройки $\Delta\nu$ равен ~ 0.5 ТГц (это соответствует пространственной дискретизации 200 мкм). Полная ширина на полувысоте пика отражения в рефлектограммах не превышала 300 мкм, что можно рассматривать как пространственное разрешение реализованной схемы. Следует отметить, что это значение может быть уменьшено до ~ 20 мкм, если для измерений будет использоваться полный диапазон перестройки лазера (~ 7 ТГц). Однако в проведенных экспериментах время измерения было ограничено размером файлов при их оцифровке с помощью цифрового осциллографа.

4. Заключение

В работе представлены первые результаты экспериментального исследования когерентного оптического частотного рефлектометра на основе волоконного лазера с самосканированием частоты. Перестройка частоты генерации в этом лазере выполняется без активно перестраиваемых элементов. Важной особенностью схемы является отсутствие триггерного интерферометра из-за дискретности перестройки частоты в используемом лазерном источнике. Схема была опробована на волоконной линии, состоящей из волоконного ослабителя и отрезка волокна с френелевским отражением на свободном выходном торце. Реализованная схема демонстрирует возможность работы рефлектометра с пространственной дискретизацией ~ 200 мкм и чувствительностью примерно до –80 дБ при длине тестовой линии ~ 9 м. В дальнейшем просматриваются следующие пути улучшения представленной рефлектометрической системы. Пространственное разрешение может быть улучшено до ~ 15 мкм, если для измерений будет использоваться максимальный диапазон перестройки длин волн излучения нашего лазера (~ 25 нм [17]). Кроме того, положительно повлиять на воспроизводимость получаемых рефлектограмм от одного скана к другому может стабилизация границ диапазона сканирования лазера, продемонстрированная при использовании волоконных брэгговских решеток [18]. Также стоит отметить, что подобные системы могут быть адаптированы для работы и в других спектральных диапазонах, например в областях 1.46 мкм [19] и 1.92 мкм [20] с висмутовым и тулиевым волоконными лазерами соответственно. Увеличения максимальной длины измеряемой линии можно достичь с помощью уменьшения частотного дискрета (скачка) лазера с самосканирования частоты. Так, например, в работе [19] для висмутового волоконного лазера было продемонстрировано уменьшение скачка частоты между импульсами до ~ 1 МГц при увеличении длины активной среды (общая длина резонатора составила ~ 100 м). Можно ожидать, что в этом случае максимальная длина линии возрастет до ~ 50 м. Чувствительность системы к обратному отражению может быть улучшена как за счет уменьшения шумов непосредственно в процессе измерений, так и при совершенствовании алгоритмов обработки данных (поимпульсного деления интерференционного и опорного сигналов). Таким образом, ожидается, что характеристики предложенной схемы КОЧР на основе волоконного лазера с самосканированием частоты в перспективе будут соответствовать известным коммерческим образцам. При этом схема сохранит простоту, связанную с отсутствием перестраиваемых элементов и устройств корректировки лазерной частоты.

Экспериментальное исследование А.Ю.Ткаченко выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00563). Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН (№0254-2019-0001). Использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» ИАиЭ СО РАН, Новосибирск.

1. Hartog A.H. *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (Boca Raton, USA: CRC Press, 2018, с. 442).
2. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics* (Cambridge, USA: Academic Press, 2012).
3. Legré M., Thew R., Zbinden H., Gisin N. *Opt. Express*, **15**, 8237 (2007).
4. Jones M.D. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, 822 (1993).
5. Lee D., Yoon H., Kim P., Park J., Kim N.Y., Park N. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 163 (2005).
6. Bahrampour A.R., Maasoumi F. *Opt. Fiber Technol.*, **16**, 240 (2010).
7. MacDonald R.I. *Appl. Opt.*, **20**, 1840 (1981).
8. Uttam D., Culshaw B. *J. Lightwave Technol.*, **3**, 971 (1985).
9. Sorin W.V., Donald D.K., Newton S.A., Nazarathy M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2**, 902 (1990).
10. Venkatesh S., Sorin W.V., Donald D.K., Heffner B.L. *Coherent FMCW Reflectometry Using a Piezoelectrically Tuned Nd:YAG Ring Laser in 8th Optical Fiber Sensors Conference* (Monterey, CA, USA, 1992).
11. Huang K., Carter G.M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 1466 (1994).
12. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. *Opt. Express*, **13**, 666 (2005).
13. <https://lunainc.com>
14. Zhao D., Pustakhod D., Williams K., Leijtens X. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **29**, 1379 (2017).
15. Ito F., Fan X., Koshikiya Y. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 1015 (2012).
16. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 045103 (2014).
17. Lobach I.A., Tkachenko A.Yu., Kablukov S.I. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 045104 (2016).
18. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Подивилов Е.В., Каблуков С.И. *Квантовая электроника*, **48**, 1132 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 1132 (2018)].
19. Lobach I.A., Kablukov S.I., Melkumov M.A., Khopin V.F., Babin S.A., Dianov E.M. *Opt. Express*, **23**, 24833 (2015).
20. Budarnykh A.E., Vladimirskaia A.D., Lobach I.A., Kablukov S.I. *Opt. Lett.*, **43**, 5307 (2018).