

ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ, МЕТРОЛОГИЯ И СЕНСОРИКА. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ¹ (обзор)

© 2023 г. М. А. Таранов^{a,c}, Б. Г. Горшков^{a,b}, А. Э. Алексеев^c,
Ю. А. Константинов^d, А. Т. Туров^{d,e}, Ф. Л. Барков^d, Zinan Wang^f,
Zhiyong Zhao^g, Mohd Saiful Dzulkefly Zan^h, Е. В. Колесниченко^{i,*}

^aООО “ПетроФайбер”

Россия, 301664, Новомосковск Тульской обл., Клинский проезд, 7

^bИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

^cФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

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

^dПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13А

^eПермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

^fUniversity of Electronic Science and Technology of China,

Shahe Campus: No. 4, Section 2, North Jianshe Road, 610054, @City@, China

^gHuazhong University of Science and Technology,

Luoyu Road 1037, Wuhan, China

^hDepartment of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

ⁱПермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

*e-mail: kolesnichenkoev@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 07.05.2023 г.

Принята к публикации 10.05.2023 г.

Настоящий литературный обзор, составленный коллективом авторов, объединенных Программным и Организационным комитетами конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика” (24–26 мая 2023 г.), призван оценить состояние и перспективы в данной области на ближайшие годы. Обзор охватывает следующие темы: распределенные акустические датчики; волоконно-оптические измерительные системы на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна; исследовательские методы, основанные на принципах оптической рефлектометрии в частотной области; низкокогерентные подходы к распределенному мониторингу температуры и деформаций.

DOI: 10.31857/S0032816223050233, EDN: ZVSHNA

1. ВВЕДЕНИЕ

Наука и техника в наши дни немислимы без такой важной прикладной дисциплины, как фотоника [1]. Отрасль телекоммуникаций позволила волоконно-оптическим технологиям продемонстрировать возможности передачи огромных объемов данных с высокой скоростью [2, 3].

Для нужд оптоэлектроники разрабатываются и производятся все новые и новые типы оптических волокон [4–6], при этом изыскиваются новаторские способы более эффективной эксплуатации старых, уже проложенных кабельных линий, создаются перспективные методы их распределенного мониторинга [7, 8]. Однако, как выяснилось, помимо мониторинга кабельных линий и параметров передачи по ним, волоконные световоды можно использовать в качестве сенсоров, воспринимающих воздействия различных внешних факторов [9, 10]. При этом немаловажным

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).

фактом является возможность определения локации (что недоступно точечным сенсорам [11, 12]), где это воздействие или их серия были совершены. Задача измерения величины воздействия и определения его локации решается методами оптической рефлектометрии [13–17], которые позволяют изучать свойства обратнорассеянного излучения в оптическом волокне: временная и/или частотная развертка обратнорассеянного излучения дают связь воздействия с координатой, а спектральные, поляризационные, фазовые и иные свойства зависят от величины воздействия. Необходимо отметить, что данные методы оказались вполне пригодными для характеристики волокон редких типов, что дает необходимую “обратную связь” при их разработке и производстве [18]. Все эти факты побудили группу научных сотрудников Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН в 2016 году организовать первую конференцию по оптической рефлектометрии (“Оптическая рефлектометрия-2016”), которая к 2020 году стала международной, сменив название на “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика” (Optical Reflectometry, Metrology & Sensing – ORMS). Настоящий литературный обзор, составленный коллективом авторов, объединенных Программным и Организационным комитетами данной конференции в 2023 году, призван оценить состояние и перспективы в данной области на ближайшие годы. Обзор разделен на четыре части, представляющие, по мнению авторов, наиболее важные направления исследований в данной области.

1. Распределенные акустические датчики [19–22], которые нашли широкое применение в инженерных науках, геофизике, мониторинге трафика и системах охраны периметров от несанкционированных вторжений. Данные системы ориентированы на точное измерение частоты и величины деформации оптического волокна, осуществляющейся с частотами от единиц герц до сотен килогерц [23–25].

2. Волоконно-оптические измерительные системы на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [26–31]. Данные системы чувствительны не только к деформациям, но и к температурам, однако ориентированы на более длительно-периодные изменения внешних факторов.

3. Измерительные системы, основанные на принципах оптической рефлектометрии в частотной области. Данные подходы распределенных исследований могут быть хорошей альтернативой бриллюэновским системам, которые представлены в разд. 2. Их привлекательной стороной является высокое разрешение, которое может достигать десятков микрон.

4. В последней, четвертой части настоящего обзора будут рассмотрены низкокогерентные си-

стемы мониторинга температуры и деформации, которые в сравнении с описанными выше подходами являются коммерчески доступными для большинства исследователей.

Данный обзор не будет включать такие направления, как распределенный температурный мониторинг на основе рассеяния Рамана [32, 33], поскольку успехи в данной области сконцентрированы, скорее, в области инженерного дела, чем в научной сфере, а также различные “гибридные” методы (например, бриллюэновский рефлектометр [34–36] или анализатор [37–40] в частотной области), поскольку данные темы, безусловно, заслуживают отдельного обзора.

2. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Мониторинг вибрационной (акустической) обстановки на сегодняшний день является жизненно важным во многих областях человеческой деятельности: при разведке месторождений полезных ископаемых [41, 42], в нефте- и газодобыче, при переработке [43] и транспортировке [44–46], эксплуатации инженерных сооружений [47, 48] и транспорта [49], охране территорий [50]. Появляются новые потенциальные области применения, например сельское хозяйство [51]. Зачастую такой вид мониторинга осуществляется при помощи волоконно-оптического распределенного акустического датчика (РАД) (Distributed Acoustic Sensor – DAS). Интеграция технологии в новые отрасли зачастую ограничивается в том числе высокой стоимостью подобных устройств.

Принцип работы РАД основан на технологии оптической рефлектометрии во временной области (ОРВО) (Optical Time-Domain Reflectometry – OTDR), предложенной в качестве метода контроля качества оптических волокон еще в 1976 г. [52]. ОРВО, в свою очередь, позволяет извлечь информацию из сигнала обратного рэлеевского рассеяния в оптическом волокне. Происхождение рэлеевского рассеяния в оптическом волокне обусловлено флуктуациями показателя преломления, которые возникают из-за неоднородностей состава и плотности волокна, вмораживаемых в его структуру в процессе изготовления, – так называемых рэлеевских рассеивающих центров. Однако источником абсолютного минимума рассеяния (имеющего место быть даже в однородных средах) принято считать термически индуцированные флуктуации энтропии. Пространственные флуктуации диэлектрической проницаемости, вызывающие рэлеевское рассеяние, можно выразить с помощью локальной плотности ρ и температуры T :

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T \Delta\rho + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial T}\right)_\rho \Delta T. \quad (1)$$

Вторым слагаемым здесь можно пренебречь, если предположить, что локальная диэлектрическая постоянная зависит от плотности больше, чем от локальной температуры. Если энтропия s и давление p – независимые термодинамические величины, то флуктуации плотности могут быть представлены как

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_s \Delta p + \left(\frac{\partial\rho}{\partial s}\right)_p \Delta s. \quad (2)$$

Второе слагаемое описывает изобарные вклады флуктуаций плотности через флуктуации энтропии Δs , вызывающие рэлеевское рассеяние. Индуцированные энтропией флуктуации плотности существуют в оптическом волокне при термодинамическом равновесии. После подстановки выражения (2) в формулу (1) и вычитания части флуктуаций диэлектрической проницаемости, ответственной за рэлеевское рассеяние, флуктуации диэлектрической проницаемости могут быть выражены как

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T \left(\frac{\partial\rho}{\partial s}\right)_p \Delta s. \quad (3)$$

Интенсивность рэлеевского рассеяния пропорциональна флуктуациям энтропии системы. Флуктуации энтропии могут быть описаны выражением, аналогичным однородному уравнению теплопроводности:

$$\rho c_p \frac{\partial\Delta s}{\partial t} - k\nabla^2\Delta s = 0, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, а k – теплопроводность.

Эти колебания подчиняются уравнению диффузии, а не волновому уравнению. Решение уравнения диффузии имеет вид [53]

$$\Delta s = \Delta s_0 e^{-\delta t} e^{-iqr}, \quad (5)$$

где δ – коэффициент затухания возмущений энтропии, q – волновой вектор, радиус-вектор.

Свет в среде может претерпевать рассеяние различной природы, которое определяется оптическими свойствами среды, например вектором поляризации \vec{P} , используемым для описания отклика гомогенной изотропной диэлектрической среды на электрическое поле \vec{E} [53]:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E}\vec{E} + \chi^{(3)} \vec{E}\vec{E}\vec{E} + \dots \right), \quad (6)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, а $\chi^{(j)}$ – тензор восприимчивости j -го порядка, ранга $j + 1$.

Можно заметить, что флуктуации энтропии не являются распространяющимися. Соответственно, восприимчивость первого порядка, пропорциональная Δs , согласно формуле (4), может вы-

зывать рассеивающую составляющую с той же частотой, что и у падающего света. Рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием света частицами или другими источниками флуктуаций показателя преломления, которые намного меньше длины оптической волны λ . Его интенсивность пропорциональна $1/\lambda^4$ [54]. Такая зависимость обуславливает большее рассеяние и, следовательно, большие потери для сигналов с меньшими длинами волн [55]. Рассматриваемое здесь рэлеевское рассеяние является спонтанным. При распространении света может возникать также и вынужденное рэлеевское рассеяние [56], но в ОРВО оно обычно не имеет достаточной интенсивности для возникновения эффекта.

Акустические (механические) воздействия также могут вызывать локальные изменения плотности, а следовательно, и показателя преломления оптической среды, что отражается на сигнале ОРВО. Это наводит на мысль о возможности регистрации акустических воздействий с помощью оптического волокна. Впервые подобный датчик был предложен в работе [57]. В исследуемое оптическое волокно (Fiber Under Test – FUT) вводится короткий мощный световой импульс, и в течение всего времени, пока он распространяется в оптическом волокне, часть его энергии рассеивается рэлеевскими центрами во всех направлениях. Некоторая часть рассеянного сигнала при этом теряется, попадая в оболочку. Другая часть, заключенная в пределах определенных телесных углов, остается способной продолжать распространение в сердцевине как в исходном, так и в обратном направлении. Для разных рэлеевских центров и прочих локальных изменений показателя преломления сердцевины оптического волокна доля сигнала, рассеянного в обратном направлении, будет разной. Сигнал обратного рэлеевского рассеяния (рефлектограмма, в англоязычной литературе – trace) регистрируется как функция времени возврата на входном конце волокна через циркулятор или разветвитель (рис. 1). Расстояние z вдоль волокна до интересующего события можно рассчитать по формуле [58]

$$z = \frac{c}{2n_g} t = \frac{v_g}{2} t, \quad (7)$$

где t – время регистрации обратного отражения, v_g – групповая скорость в оптическом волокне, n_g – групповой показатель преломления сердцевины волокна.

Одна рефлектограмма или их усредненная последовательность может дать достоверную информацию лишь о статическом событии – например, дефекте оптического волокна, вызывающем постоянные во времени потери сигнала. Поскольку акустическая волна представляет собой динамическое событие – распространяющиеся

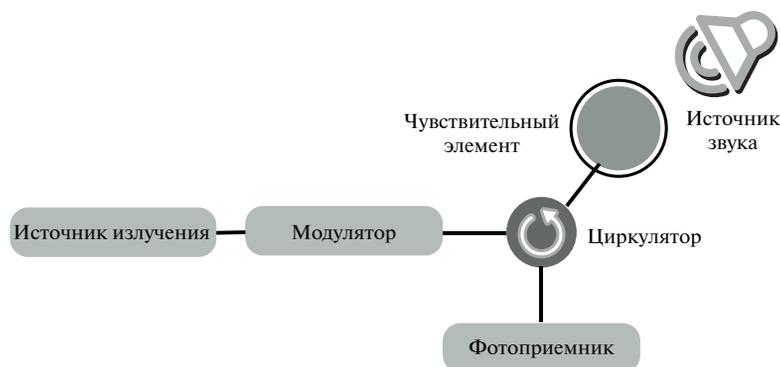


Рис. 1. Схематическое устройство простейшего РАД.

периодические сжатия/разрежения среды, при взаимодействии акустической волны с оптическим волокном показатель преломления его сердцевины модулируется с той же частотой, что и у механической волны, оказывающей воздействие. Его значение в этой области колеблется в некоторых пределах, зависящих от амплитуды волны, и становится то чуть больше, то чуть меньше величины, соответствующей состоянию покоя. Поскольку данное явление фактически можно рассматривать как периодическое локальное изменение плотности сердцевины, акустическая волна вызывает и периодическое смещение рэлеевских рассеивающих центров. Все эти явления, несомненно, оказывают влияние на сигнал обратного рассеяния и проявляются в виде модуляции его интенсивности с частотой падающей акустической волны в той точке z , в которой эта волна взаимодействует с волокном. Соответственно, чтобы с помощью описанной системы достоверно обнаружить акустическое событие, т.е. наиболее точно определить частоту и амплитуду периодических изменений уровня сигнала в интересующей точке, необходимо осуществлять сбор данных (запись рефлектограмм) последовательно и непрерывно в течение некоторого времени. Время сбора данных в том числе определит и минимальную разрешаемую частоту воздействия, в то время как частота сбора данных (количество рефлектограмм, получаемых в единицу времени) – максимальную.

Пространственное разрешение в ОРВО является функцией длительности импульса [59]. Длительность импульса τ соответствует расстоянию $\Delta z = v_g \tau / 2$. Динамический диапазон в ОРВО зависит от чувствительности системы, являющейся функцией длительности импульса, мощности импульса и чувствительности фотодиода. Высокая мощность и длительность импульса увеличивают отношение сигнал/шум (ОСШ) ценой ухудшения пространственного разрешения из-за большей ширины импульса. Кроме того, мощ-

ность входного импульса должна оставаться ниже уровня, при котором возникают нелинейные эффекты.

Позднее было предложено увеличить динамический диапазон, например, при помощи гетеродинного детектирования – когерентной ОРВО [60]. В данном устройстве источник излучения используется и для генерации импульсов света, идущих в оптическое волокно, и в качестве локального осциллятора. Сигнал обратного рассеяния оптического волокна интерферирует с сигналом локального осциллятора на фотоприемнике, увеличивая отношение сигнал/шум.

Версия оптической схемы без использования так называемой “линии задержки” – сигнала локального осциллятора – получила распространение в фазочувствительной рефлектометрии [61]. В данном случае интерференция происходит между компонентами самого сигнала обратного рассеяния в пределах длительности импульса. Протяженность датчиков, основанных на подобной реализации, однако, ограничена длиной когерентности используемого источника излучения.

К настоящему времени было преодолено частично или полностью множество трудностей и ограничений, связанных с эксплуатацией РАД: низкое отношение сигнал/шум, необходимость в дополнительных компонентах (усилителях, фильтрах, модуляторах) [62], небольшая полоса пропускания, также сказывающаяся на протяженности чувствительного элемента [63]. Зачастую обеспечение лидирующих позиций датчика по какому-либо параметру достигается за счет существенного усложнения и, следовательно, повышения стоимости конструкции по сравнению с классической ОРВО, приспособленной для распределенного акустического мониторинга [64] (рис. 2).

Поскольку на данный момент наибольшее распространение РАД имеют в финансово обеспеченных отраслях, где результат превышает стоимости, это не является значительной проблемой.

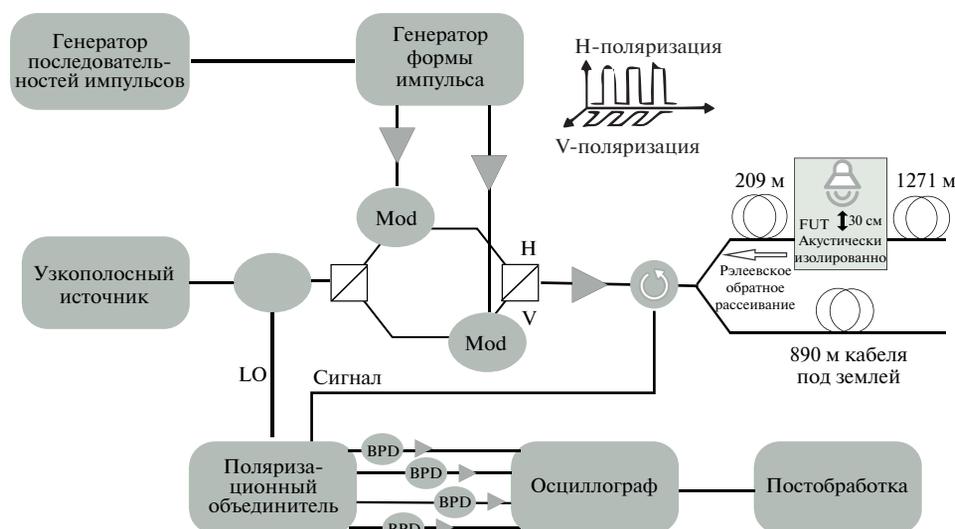


Рис. 2. Распределенный акустический датчик для записи речи (схематически). Mod – модулятор; BPD – балансный фотодетектор; LO – локальный осциллятор; FUT – оптическое волокно.

Однако по мере выявления необходимости в подобном инструменте в других отраслях науки, техники и в производстве возникает и другое направление развития РАД – обеспечение приемлемого для данной отрасли, например сельского хозяйства, качества распределенного акустического мониторинга при наиболее низкой его стоимости. Так, в работе [65] для этого использован высококогерентный источник импульсного излучения, реализующий преимущества когерентной рефлектометрии и в то же время – прямое детектирование сигнала без извлечения информации о фазе, что, кроме прочего, избавляет от необходимости использования дорогостоящего оборудования, например оптического гибридного фотоприемника.

Однако, согласно работе [66], подобное оборудование может быть заменено и соответствующим программным обеспечением.

Таким образом, в данный момент одной из основных областей совершенствования является обработка данных. Так, кроме примера, упомянутого выше, можно отметить классификацию источников воздействия [67] или очистку полезного сигнала от шума [68, 69] при помощи технологий искусственного интеллекта, ведущую роль в которых играют нейронные сети.

Так, исследователи из Германии предлагают не только регистрировать положение и скорость составов на железной дороге с помощью РАД, но и проверять их целостность, отслеживая и подсчитывая отдельные колесные тележки или их группы при помощи нейросети [70].

Ученым из Саудовской Аравии и Китая удалось не только успешно применить РАД для изучения активности личинок красного пальмового

долгоносика, но и использовать нейронную сеть для снижения количества ложных срабатываний на 20% [71].

Предлагается даже использовать РАД на основе уже проложенных телекоммуникационных оптических волокон для распределенного и, при необходимости, удаленного метеорологического мониторинга. А технологии искусственного интеллекта позволяют определить тип и характеристики погодного явления, например интенсивности дождя [72].

Представленные материалы позволяют сделать вывод о том, что технология РАД, известная уже более 30 лет, все еще не теряет популярности. Дальнейшее развитие отрасли может быть обеспечено успешной комбинацией с технологиями искусственного интеллекта, которые стали широко применяться совсем недавно. Как показывают наиболее свежие работы в этой области, они способны открыть возможности не только для совершенствования регистрации событий за счет принципиально новых методов обработки данных, но и для сокращения расходов на аппаратную составляющую РАД, что позволит расширить область их применения.

Несмотря на то что достаточно много исследователей и разработчиков заявляют о точных измерениях величин быстро меняющихся деформаций, метод РАД все же остается оптимальным именно для регистрации частот.

Если нужно измерить длиннопериодную деформацию или изменение температуры, прибегают к использованию других средств, основанных как на рассеянии Рэлея, так и на рассеянии Мандельштама–Бриллюэна. Об этом будет рассказано в следующих главах настоящего обзора.

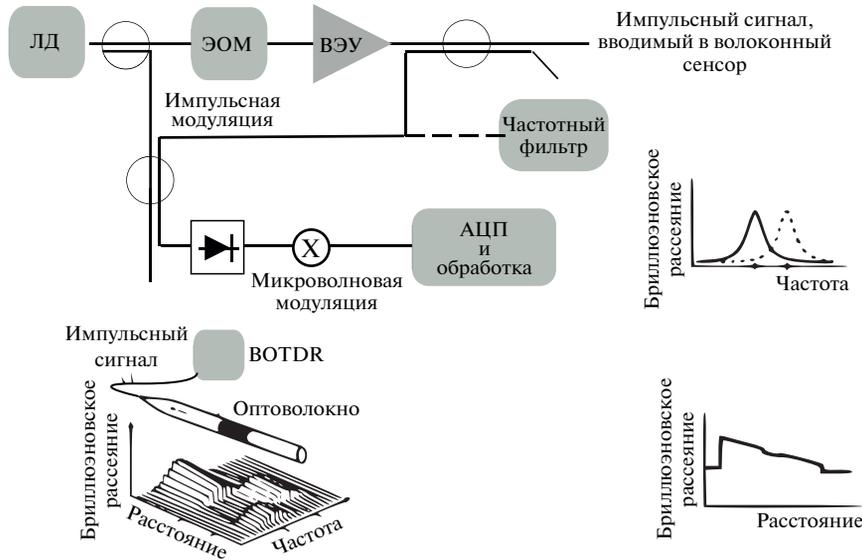


Рис. 3. Стандартная установка на основе бриллюэновского оптического рефлектометра во временной области, в которой локальный бриллюэновский сдвиг частоты восстанавливается либо гетеродинным методом, либо через использование частотной фильтрации. ЛД – лазерный диод; ЭОМ – электрооптический модулятор; ВЭУ – волоконный эрбиевый усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; BOTDR – бриллюэновский оптический рефлектометр во временной области.

3. МЕТОДЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

В основе бриллюэновской рефлектометрии лежит явление бриллюэновского рассеяния света на акустических фононах. Рассеяние носит неупругий характер, изменение частоты света – бриллюэновский сдвиг частоты (БСЧ) (Brillouin Frequency Shift – BFS) – задается соотношением $\nu_b = 2nv/\lambda$, где n – показатель преломления, ν – скорость звука продольной акустической волны, λ – длина волны в вакууме. Поскольку показатель преломления и скорость звука зависят от внешних воздействий, таких как температура и деформация, измерение БСЧ может дать информацию о величине этих воздействий вдоль волокна.

Различают спонтанное и вынужденное бриллюэновское рассеяние. Спонтанное рассеяние фотонов происходит на уже существующих в волокне при ненулевой температуре фононах. При вынужденном рассеянии фотоны рассеиваются на фононах, искусственно создаваемых за счет эффекта электрострикции (уплотнения материала под влиянием сильного электромагнитного поля) при запуске в волокно с разных концов двух оптических волн разной частоты, – динамических брэгговских решетках.

На спонтанном рассеянии основана работа бриллюэновского оптического рефлектометра во временной области (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer – BOTDR). Типичная схема такого рефлектометра [73] представлена на рис. 3. Опти-

ческое излучение вводится в волокно, на фотоприемник поступает обратнорассеянная бриллюэновская стоксова компонента. Фильтры служат для исключения имеющих гораздо большую мощность рэлеевской и рамановской компонент. Для извлечения БСЧ используется либо схема гетеродинирования, либо интерферометрические схемы.

На вынужденном рассеянии строится работа бриллюэновского оптического анализатора во временной области (Brillouin Optical Time Domain Analyzer – BOTDA). Типичная схема такого анализатора [74] представлена на рис. 4.

С одного конца волокна запускается непрерывная зондирующая оптическая волна с частотой ν , с обратного – импульсная волна накачки с большей частотой, $\nu + \Delta\nu$. Интенсивность перекачки мощности из волны накачки (а следовательно, и мощность, регистрируемая фотоприемником) зависит от соотношения разности частот $\Delta\nu$ и БСЧ ν_b . При $\Delta\nu = \nu_b$ эта интенсивность максимальна, а вообще зависимость носит лоренцев характер: $g(\Delta\nu) = g_b(\Delta/2)^2 / [(\Delta/2)^2 + (\Delta\nu - \nu_b)^2]$, где g – логарифмический коэффициент усиления, g_b – пиковый коэффициент бриллюэновского усиления, Δ – ширина линии.

Перестраиваясь по частоте одной из волн (зондирования или накачки) и измеряя мощность пришедшей зондирующей волны, получают спектр бриллюэновского усиления, из которого извлекается БСЧ.

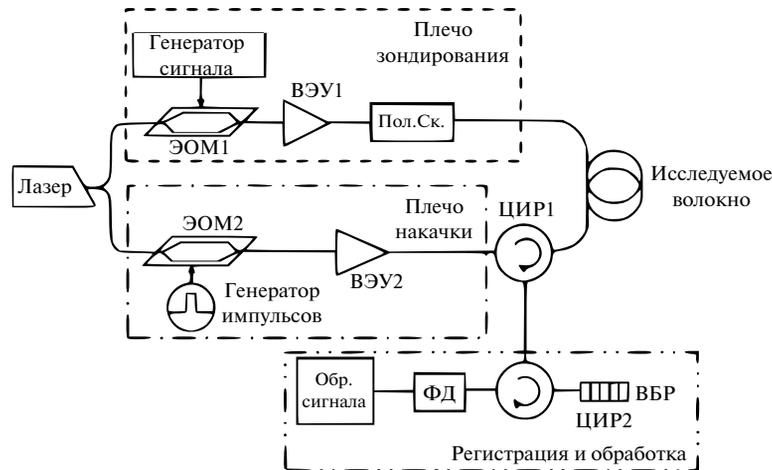


Рис. 4. Схема бриллюэновского оптического анализатора во временной области. ЭОМ – электрооптический модулятор; ВЭУ – волоконный эрбиевый усилитель; ЦИР – циркулятор; ВБР – волоконная брэгговская решетка; Пол.Ск. – поляризационный скремблер; ФД – фотодиод.

Недостатком такой схемы является низкий выходной сигнал, ведь основная мощность закачивается в зондирующую волну, а не в волну накачки. В связи с этим применяется и другая схема [75], в которой зондирующая волна – импульсная, а волна накачки – непрерывная. Соответственно измеряется бриллюэновский спектр поглощения волны накачки, из которого извлекается БСЧ.

Неоспоримым преимуществом бриллюэновского оптического рефлектометра во временной области является то, что требуется доступ только к одному концу волокна. Кроме того, для бриллюэновского оптического анализатора во временной области необходимо иметь лазер с шириной линии излучения много меньше Δ . Однако в бриллюэновском оптическом рефлектометре во временной области возникают проблемы, связанные с низкой мощностью сигнала, поскольку спонтанное рассеяние примерно в 100 раз слабее вынужденного. Особо следует подчеркнуть, что в противоположность, например, распределенному датчику температуры, где измеряемый параметр – это мощность излучения, сам факт наличия вынужденного рассеяния в бриллюэновском оптическом анализаторе во временной области не представляет никакой проблемы, поскольку не искажает измеряемый параметр.

В типовом волокне вышеприведенные величины имеют следующий порядок: БСЧ – 11 ГГц, $\Delta = 30\text{--}40$ МГц, чувствительность БСЧ к температуре 1 МГц/К, а к деформации 40–50 МГц/1000 мк (где мк – микрострейн, $\text{мкм} \cdot \text{м}^{-1}$).

Как и в других видах рефлектометрии, основными характеристиками измерительной системы являются пространственное разрешение, длина линии, точность измерения параметров и быст-

родействие. Ниже представлены основные проблемы на пути улучшения этих характеристик и попытки их преодоления.

Точность определения БСЧ в заданном спектре зависит от конкретного используемого алгоритма, но в целом ошибка определения БСЧ обратно пропорциональна отношению сигнал/шум (ОСШ), пропорциональна корню квадратному из шага сканирования по частоте и корню квадратному из ширины бриллюэновского спектра [76]. Уменьшение шага сканирования, равно как и накопление сигнала (а следовательно, повышение ОСШ), ведут к повышению точности системы, но в то же время уменьшают ее быстродействие. Таким образом, одним из наиболее важных направлений дальнейшего развития является повышение ОСШ не за счет времени накопления.

В литературе описаны успешные как аппаратные, так и программные подходы увеличения ОСШ путем модуляции частоты зондирующей волны [77], модуляции амплитуды зондирующей волны и волны накачки [78], а также цифровой фильтрации сигнала [79, 80].

Важно исключить паразитные факторы, приводящие к уменьшению полезного сигнала. Одним из таких факторов является поляризационное замирание сигнала. Интенсивность перекачки зависит от поляризаций обеих волн (максимальна при совпадении поляризаций и равна нулю при ортогональных поляризациях), а поскольку стандартные волокна могут не сохранять поляризацию, интенсивность в некоторых точках сильно падает. Данная проблема обычно решается использованием поляризационных скремблеров для одной-обеих волн с последующим усреднением. Существуют и другие подходы, например, в работе [81] была применена схема без скремблера

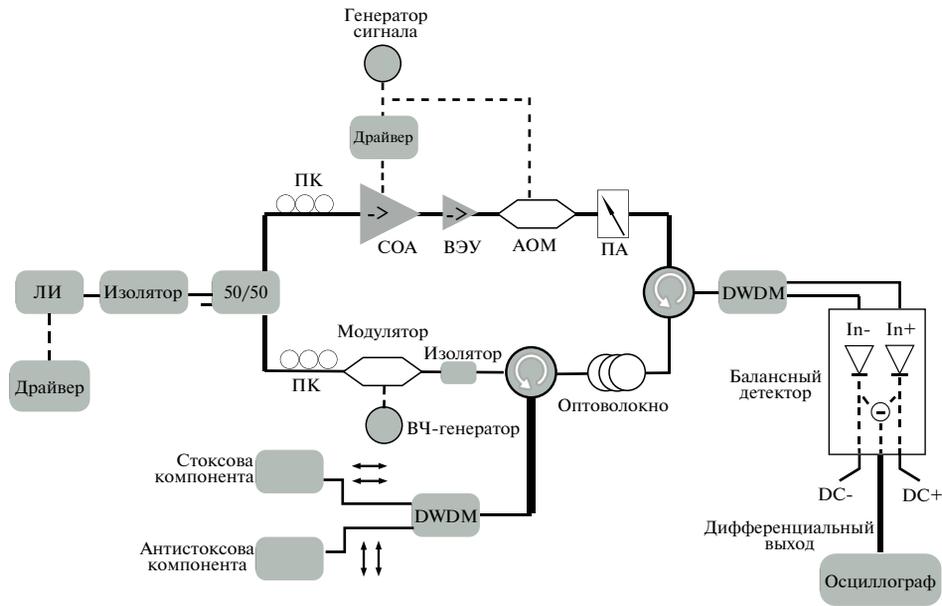


Рис. 5. Экспериментальная установка на основе бриллюэновского оптического анализатора во временной области с балансным детектором и устранением поляризационного шума. COA – полупроводниковый оптический усилитель; ВЭУ – волоконный эрбиевый усилитель; ПА – перестраиваемый аттенюатор; ЛИ – лазерный источник; АОМ – акустооптический модулятор; ПК – поляризационный контроллер; DWDM – частотно-селективный ответвитель.

(рис. 5). Стоксова и антистоксова бриллюэновские компоненты, ортогональные по поляризации за счет использования обычного и фарадеевского зеркал, поступают на два входа балансного фотодетектора. В любой точке волокна сразу две эти компоненты не могут быть ортогональны по поляризации волне накачки.

Другой фактор – истощение накачки (особенно в длинных линиях). Схема, представленная на рис. 5, позволяет компенсировать этот паразитный эффект. Отсечение антистоксовой компоненты происходит непосредственно перед детектированием, что позволяет компенсировать падение мощности накачки за счет поглощения энергии из антистоксовой компоненты по всей длине волокна.

Что касается применяемых алгоритмов извлечения БСЧ из заданного спектра, наибольшее распространение получили методы аппроксимации лоренцевой функцией (Lorentzian Curve Fitting – LCF), представленные, например, в работе [82]. Используются и корреляционные методы – поиск максимальной корреляции между измеренным и одним из опорных спектров [83, 84] или максимальной корреляции между исходным и отраженным относительно вертикальной оси спектрами [85]. Нельзя не упомянуть и перекрестно-рекуррентный графический анализ [86], в котором ищутся наиболее схожие части измеренного и опорного спектров. Все большее распространение получают методы машинного обучения: на этапе обучения такая система ищет связи между

какими-то характеристиками спектров и БСЧ, а на этапе измерения определяет БСЧ по характеристикам заданного спектра, используя найденные связи. Методы машинного обучения включают нейронные сети с прямой связью [87], обобщенную линейную модель (обобщение классической линейной регрессии) [88], метод опорных векторов [89] и другие (см., например, обзор [14]). Современные нейросетевые алгоритмы сразу ищут связь между характеристиками спектра и измеряемыми параметрами, такими как температура и деформация, БСЧ как “промежуточное звено” может быть исключен из рассмотрения. Нейросетевые алгоритмы могут применяться как сами по себе, так и в комбинации с другими методами [29].

Пространственное разрешение определяется главным образом длительностью импульса. При этом уменьшение длительности приводит к размыванию бриллюэновского спектра [90], что в соответствии с вышесказанным уменьшает точность системы. Однако в работе [91] было продемонстрировано, что использование ультракоротких (10 нс, что меньше времени жизни фонона) импульсов может приводить к обратному сжатию бриллюэновского спектра (рис. 6).

Конечно, по аналогии с другими видами рефлектометрии, пространственное разрешение может быть повышено как за счет использования кодированных импульсов [93], так и за счет перехода в частотную область [94]. Также применяются методы “предусиления акустического поля”.

Например, техника использования пары импульсов разной длительности [95] позволила достичь разрешения в десятки сантиметров на линиях длиной десятки километров.

Длина измеряемой линии, по сути, лимитируется все тем же пресловутым ОСШ. Для работы с линиями длиной более 100 км используются следующие подходы: включение в линию эрбиевых усилителей, использование распределенного рамановского усиления [96], использование кодированных импульсов [97].

Важным аспектом является проблема кросс-чувствительности: бриллюэновский сдвиг зависит и от температуры, и от деформации, поэтому требуется дополнительный инструмент для разделения этих воздействий. Например, можно регистрировать одновременно бриллюэновское и рамановское (чувствительное только к температуре) рассеяния [98] или бриллюэновское и рэлеевское рассеяния (отношение интенсивностей которых определяется соотношением Ландау–Плачека) [99]. В случае использования датчика, основанного только на бриллюэновском рассеянии, необходимо измерять два БСЧ с последующим пересчетом в температуру и деформацию с использованием очевидного соотношения:

$$\begin{pmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1T} & C_{1\epsilon} \\ C_{2T} & C_{2\epsilon} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Были продемонстрированы возможности использования волокна с двумя оптическими модами [100], а также с одной оптической и двумя акустическими модами [101]. Однако по состоянию на настоящий момент данные исследования носят лишь лабораторный характер.

Потенциальная область применения волоконно-оптических датчиков на бриллюэновском рассеянии не ограничивается измерением температуры и деформации — можно измерять и другие физические величины, например, влажность [102], давление [103], акустические воздействия [104] и пр.

Бриллюэновские рефлектометры и анализаторы во временной области обеспечивают достаточно грубое разрешение, обусловленное длительностью импульса. Уменьшение длительности импульса и последующая обработка сигнала позволили приблизиться к разрешению порядка 10 см. Однако затем выяснилось, что высокоточные измерения температур и деформаций с высоким разрешением по пространственной координате удобнее осуществлять методами оптической рефлектометрии в частотной области. О ней будет рассказано в следующей главе настоящего обзора.

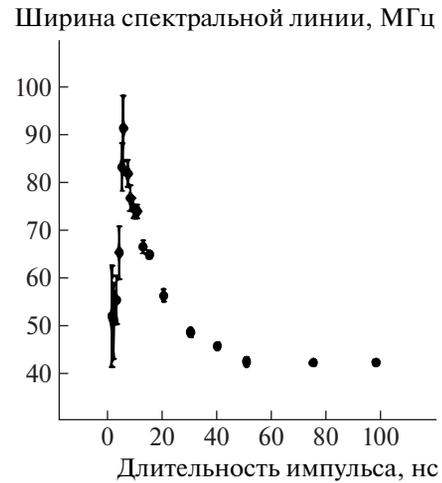


Рис. 6. Обратное сжатие бриллюэновского спектра [92].

4. МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Когда традиционная оптическая рефлектометрия во временной области достигла своих пределов по пространственному разрешению, исследователи и инженеры озадачились созданием нового инструмента. Результатом таких работ стало появление нового метода, получившего название оптическая рефлектометрия в частотной области (ОРЧО) (Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR). Различные модификации оптических рефлектометров в частотной области могут быть сконструированы на основе как когерентных, так и некогерентных источников. В первом случае используется когерентный, перестраиваемый по частоте источник излучения, а ценной информацией является продукт интерференции двух монохроматических сигналов, немного различающихся по частоте (за счет перестройки частоты и разницы во времени между конкретным центром рассеяния и опорным сигналом). Во втором случае используется широкополосный источник, излучение которого модулируется также смещающимся по частоте радиочастотным сигналом. Особое распространение получили системы с когерентным лазерным источником. В данном обзоре мы не будем подробно останавливаться на рефлектометрах частотной области, реализованных по принципу радиочастотной модуляции широкополосного источника излучения: во-первых, они не столь широко распространены, во-вторых, их принцип во многом схож с ОРЧО с перестраиваемым по частоте лазером.

Итак, когерентные рефлектометры могут быть реализованы на основе разных интерферометров.

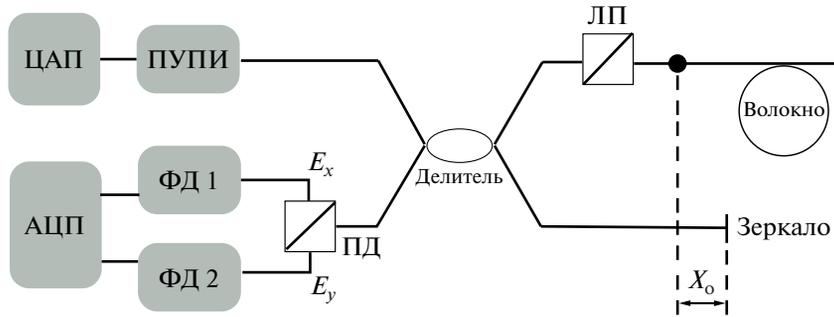


Рис. 7. Оптический рефлектометр частотной области на основе интерферометра Майкельсона. ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ПУПИ – перестраиваемый узкополосный источник; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФД – фотодетектор; ПД – поляризационный делитель; ЛП – линейный поляризатор [105].

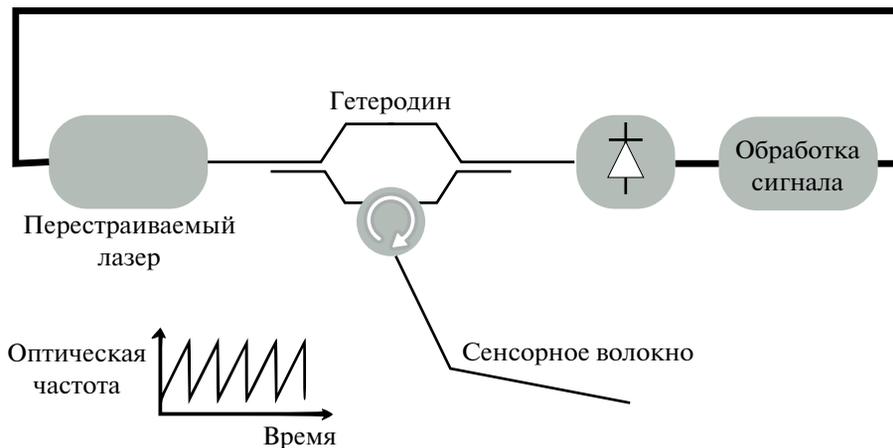


Рис. 8. Оптический рефлектометр частотной области на основе интерферометра Маха–Цендера. Адаптировано из работы [106].

Рассмотрим простейшую установку на основе интерферометра Майкельсона (рис. 7).

Перестраиваемый по длине волны источник излучения скоммутирован с X-образным оптическим делителем. К одному из выходов этого делителя подключен исследуемый образец, к другому – отражатель с коэффициентом Френеля r . Ко второму входу делителя подключен фотоприемник, который регистрирует интерференцию рассеяния от каждой точки в волокне и отражения r . Вполне очевидным является факт, что на делитель в каждый отдельно взятый момент времени приходит вернувшаяся назад часть одного и того же излучения: в случае сигнала, вернувшегося из исследуемого образца, – с задержкой во времени, пропорциональной расстоянию до конкретного отражателя или рэлеевского центра в волокне, а в случае сигнала, вернувшегося с отражателя, – почти без задержки. Поскольку источник излучения перестраивается во времени линейно, частоту интерференционного биения на детекторе можно достоверно связать с координатой в оптическом волокне. Информацию о зависимости коэффи-

циента обратного рассеяния (а следовательно, и о физических воздействиях, которым подвергается волокно) от координаты по длине волокна можно получить при помощи спектрального анализа.

Такую же схему можно организовать и на интерферометре Маха–Цендера (рис. 8). Это требует наличия в схеме трех Y-разветвителей (либо двух Y-делителей и одного циркулятора), однако итоговая интенсивность излучения не будет зависеть от показателя преломления зеркала и его возможных флуктуаций.

Запишем выражение для электрического поля, возникающего в опорном плече интерферометра [107]:

$$E_r(t) = E_0 \exp\left\{j\left[2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2 + e(t)\right]\right\}, \quad (9)$$

где f_0 – стартовая частота перестройки лазера; t – время; γ – скорость перестройки (данный компонент умножен на время t дважды, поскольку характеризует изменение во времени величины, уже во времени меняющейся); $e(t)$ – нелинейные фазовые шумы.

Тогда обратнорассеянное электрическое поле можно записать как

$$E_S(t) = \sqrt{R(\tau)}E_0 \times \exp\left\{j\left[2\pi f_0(t - \tau) + \pi\gamma(t - \tau)^2 + e(t - \tau)\right]\right\}, \quad (10)$$

где $R(\tau)$ – коэффициент обратного рассеяния в точке волокна, соответствующей задержке по времени τ движения света в двух плечах интерферометра. По принципу суперпозиции результирующее поле в выходном делителе схемы будет выглядеть как

$$E_\Sigma = E_r + E_S, \quad (11)$$

а интенсивность интерферирующего сигнала как

$$I = |E_r + E_S|^2. \quad (12)$$

Проще всего вычислить интенсивность, построив треугольник из векторов $E_r, E_S, E_r + E_S$ и воспользовавшись теоремой косинусов:

$$I = E_r^2 + E_S^2 + 2E_rE_S \cos \varphi, \quad (13)$$

где φ – угол между векторами E_r и E_S , иными словами, разность аргументов экспонент в соответствующих выражениях для E_r и E_S .

Таким образом,

$$I(t) = (1 + R)E_0^2 + 2\sqrt{R(\tau)}E_0^2 \times \cos\left\{2\pi\left(f_0\tau - \frac{\gamma\tau^2}{2} + \gamma t\tau\right) + e(t) - e(t - \tau)\right\}. \quad (14)$$

Первое слагаемое в выражении (14) – константа, второе представляет собой изменяющуюся во времени добавку к интенсивности, обусловленную интерференцией отраженного от зеркала и обратнорассеянного от определенной точки волокна сигналов. Заметим, что если пренебречь шумовой составляющей $e(t) - e(t - \tau)$, то добавка будет иметь строго периодическую зависимость от времени t , причем частота колебаний во времени f_{beat} равна $\gamma\tau$ (остальные слагаемые под знаком косинуса от времени t не зависят и представляют собой начальный сдвиг фазы). А время задержки τ , в свою очередь, линейно связано с расстоянием до точки, в которой происходит рассеяние. Таким образом, каждому центру рассеяния соответствует своя гармоника с интенсивностью, регистрируемой детектором, и, разложив полученную интенсивность в ряд Фурье, мы сразу получим информацию о зависимости коэффициента обратного рассеяния по длине волокна.

Зависящая от времени добавка к интенсивности, регистрируемой детектором, равна

$$I_\Sigma(t) = \sum_{\tau=0}^{\tau_{\text{max}}} 2\sqrt{R(\tau)}E_0^2 \cos\{2\pi(\gamma t\tau + v)\}, \quad (15)$$

где суммирование ведется по всем центрам рассеяния, а время задержки τ_{max} соответствует концу оптоволоконной линии. Зная показатель преломления сердцевины волокна n и длину измеряемого образца L_{max} , время задержки можно выразить как $\tau_{\text{max}} = 2nL_{\text{max}}/c$, где c – скорость света в вакууме. Двойное значение длины объясняется двойным путем от лазера до конкретной неоднородности и обратно (к детектору). Очевидно, что с любым временем задержки τ может быть связано любое значение длины волокна L :

$$\tau = \frac{2nL}{c}. \quad (16)$$

Умножим данное выражение на скорость перестройки частоты лазерного источника γ , получим:

$$\tau\gamma = \frac{2nL\gamma}{c} = f_{\text{beat}}. \quad (17)$$

Тогда координату в волокне можно связать с частотой интерференционных биений как

$$L = \frac{cf_{\text{beat}}}{2n\gamma}. \quad (18)$$

Таким образом, взяв преобразование Фурье от $I_\Sigma(t)$, можно получить набор частот, соответствующих конкретным пространственным координатам по длине волокна. Интенсивности колебаний этих частот будут представлять собой величины обратных отражений в данных локациях. Фактически, это будет аналог рефлектограммы, получаемой при помощи ОРВО, но без зависимости пространственного разрешения от длины импульса. Пример рефлектограммы частотной области, полученной в процессе исследования интегрально-оптического модулятора, представлен на рис. 9.

В методе ОРЧО пространственное разрешение определяется по большей части диапазоном и линейностью перестройки лазера, а также алгоритмами обработки данных и интенсивностью шумов различного происхождения. Первый довод можно легко подтвердить с использованием выражения для $I_\Sigma(t)$: чем дольше на фотодетекторе будет длиться пропись каждой гармоники, тем больше ее периодов окажется в массиве обрабатываемых данных, а значит, тем ближе такая гармоника будет к дельта-функции после преобразования Фурье. Также выделение ограниченного числа отсчетов можно представить как умножение анализируемой функции на оконную. Это довольно сильно искажает сигнал, “размывая” его по шкале частот [109]. В качестве иллюстрации этого эффекта на рис. 10 представлен результат дискретного преобразования Фурье прямоугольной оконной функции длительностью 50 отсчетов.

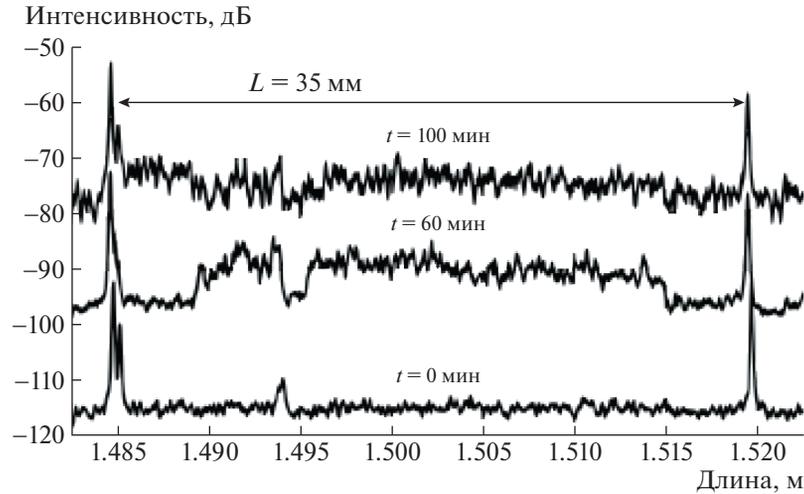


Рис. 9. Рефлектограмма интегрально-оптического модулятора, полученная для трех разных моментов термоцикла [108].

В работе исследовательской команды Zhao и др. [111] представлены достаточно простые, но при этом эффективные способы компенсации упомянутой выше нелинейности перестройки лазера. Интерферометр-счетчик и программный алгоритм, основанный на обнаружении нулевого значения регистрируемого сигнала, т.е. “пересечений нуля” (Zero-Crossing – ZC), были реализованы и исследованы с использованием специальной схемы. Выборка частот интерференционных биений (20 МГц) с равными интервалами достигнута авторами в режиме реального времени. Максимальная длина исследуемого волокна может достигать длины большего из плеч вспомога-

ного интерферометра. Кроме того, эта же научная группа описывает собственный подход к коррекции нелинейности, основанный на методе “самореферентности” и не предполагающий наличия вспомогательного интерферометра. В этом случае вся информация о функции перестройки частоты лазера для дальнейшей компенсации нелинейности извлекается из так называемого “донного импульса” (End-Face Reflection).

Научной группой Zhong и др. [112] интерферометр-счетчик традиционного бриллюэновского оптического рефлектометра во временной области был заменен специально подготовленным дуговым выходным торцом исследуемого волокна для генерации сигнала отражения с соответствующей интенсивностью, что позволило успешно зарегистрировать фактическую мгновенную частоту лазера и использовать ее для самокомпенсации. Предложенный стенд успешно обеспечивал распределенное измерение температуры с пространственным разрешением 3 мм (на образце длиной 108 м) без уменьшения скорости измерения. Пространственное разрешение 5 мм было достигнуто на образце длиной 170 м. Такая система ОРЧО с низкой стоимостью и хорошими характеристиками имеет потенциал развития в области распределенных измерений.

Однако метод “пересечений нуля” при всей своей простоте и эффективности имеет существенный недостаток – выбираются только данные в области нулевых значений показаний интерферометра-счетчика. Чтобы не терять огромное количество дискретных отсчетов в исследуемом сигнале, Guo и др. [113] представили метод, основанный на равночастотной передискретизации (Equal Frequency Resampling – EFR). Если говорить простым языком, было предложено выде-

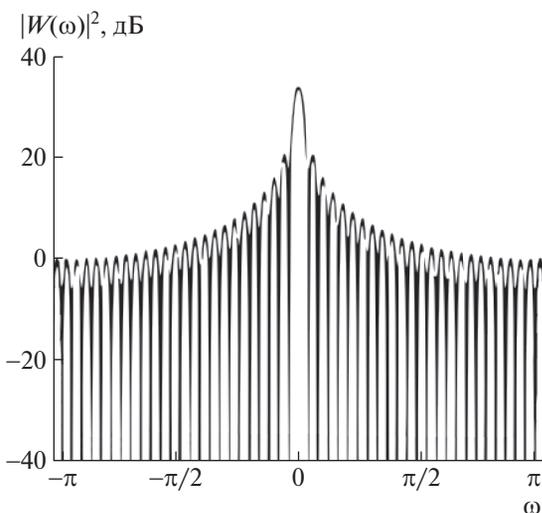


Рис. 10. Результат дискретного преобразования Фурье прямоугольной оконной функции длительностью 50 отсчетов [110].

лить в опорном сигнале нужное количество эквидистантно отдаленных друг от друга “осей абсцисс” и принимать в рассмотрение данные, приходящиеся на все пересечения. В первых опытах команде не удалось добиться эффективного увеличения разрешения (1 см в волокне длиной 105 м), однако была достигнута погрешность измерения температуры $\pm 0.15^\circ\text{C}$.

Wang и др. [114] справедливо отмечают, что существует противоречие между разностью оптических путей в плечах вспомогательного интерферометра и эффектом коррекции. Короткая задержка полезна для захвата мгновенной девиации частоты, но при этом ухудшает эффект коррекции из-за низкой частоты биений. Более длинная разность оптических путей вспомогательного интерферометра увеличивает массив полезных данных, но ухудшает эффект коррекции из-за нарастающего шума. Авторы рассматриваемой работы представили метод использования акустооптического модулятора в качестве устройства для сдвига частоты во вспомогательном интерферометре, который может генерировать большую частоту биений с малой длиной задержки, что при корректном применении дает заметное увеличение пространственного разрешения.

Также существует достаточно много публикаций по ОРВО, посвященных сенсорной тематике [107, 115]. Методы, описываемые в данных работах, можно в большинстве своем охарактеризовать как способ извлечения фазы сигнала с последующей связью этой величины с пространственной координатой при помощи математической обработки сигнала [107, 116]. Эти исследования уже нашли широкое применение в науке и технике [117, 118]. Обсуждение упомянутых выше подходов ОРВО и их применений заслуживает отдельной обзорной работы.

Одним из существенных недостатков оптической рефлектометрии в частотной области является высокая стоимость компонентов, необходимых для реализации экспериментальной установки или законченного прибора. Так, зачастую аппаратная реализация подразумевает использование высококогерентного, перестраиваемого линейно по частоте лазерного источника. Другой подход реализации схемы ОРЧО подразумевает применение дорогого радиочастотного электронного оборудования. Получить практически тот же самый измерительный функционал (кроме пространственного разрешения), но с использованием не таких дорогостоящих компонентов можно, используя подход низкокогерентной рефлектометрии. Этому будет посвящена следующая глава настоящего обзора.

5. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ РАССЕЯНИЯ РЭЛЕЯ

К развивающимся направлениям волоконно-оптической сенсорики относятся распределенные измерения статических деформации и температуры за счет регистрации спектров рассеяния Рэля. Такого рода измерения особо востребованы в сфере строительства и эксплуатации инженерных сооружений с целью непрерывного мониторинга их структурного состояния (Structural Health Monitoring – SHM). Принцип действия датчиков на основе регистрации спектров рассеяния Рэля состоит в рефлектометрическом опросе чувствительного элемента – оптического волокна, закрепленного вдоль контролируемого объекта, на различных длинах волн в пределах некоторого спектрального диапазона. Полученные при этом зависимости мощности сигнала обратного рассеяния от длины волны принято называть спектрами рассеяния Рэля. Рефлектометрический характер опроса позволяет получить спектр для каждого пространственного канала оптического волокна. При изменении деформации или температуры произвольного пространственного канала происходит смещение спектра рассеяния этого канала, причем величина смещения пропорциональна изменению деформации или температуры [119, 120]. Таким образом, задача измерений сводится к определению величины смещения спектра рассеяния Рэля в каждом пространственном канале с последующим пересчетом этой величины в единицы деформации или температуры. Рис. 11 поясняет описанный принцип действия.

Технология датчиков рассматриваемого типа развивалась на протяжении более 20 лет. К ее появлению привела идея распределенных измерений за счет регистрации спектров рассеяния Рэля, впервые сформулированная в работе [119]. Реализуемость идеи подтверждалась экспериментом по измерению продольной относительной деформации участка оптического волокна длиной 5 м. Экспериментальная установка представляла собой рефлектометр на основе лазерного диода, длина волны излучения которого перестраивалась за счет изменения базы внешнего резонатора при помощи пьезокерамического актюатора. Неопределенность измерений составила $5 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$, пространственное разрешение – 30 см. Диапазон измеряемых воздействий был ограничен величиной $60 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$, что в совокупности с малой длиной измеряемого оптического волокна представляется недостаточным для решения большинства практических задач. Тем не менее простота технической реализации и высокая чувствительность спектров рассеяния Рэля к изменению де-

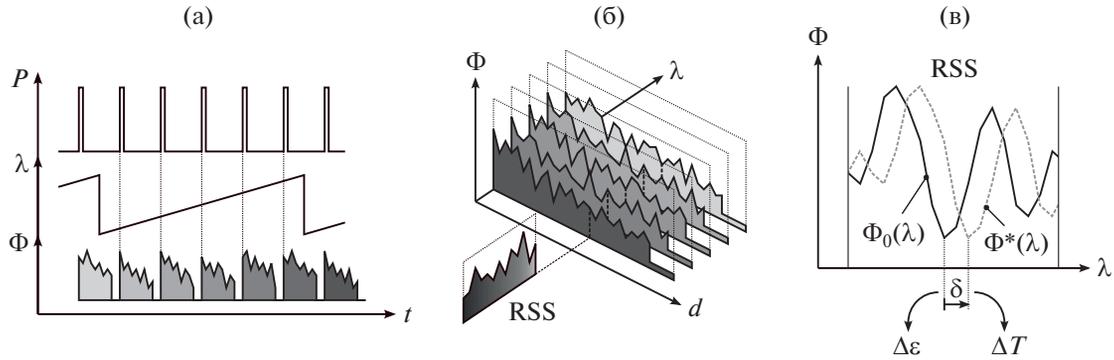


Рис. 11. Принцип измерения деформации и температуры оптического волокна за счет регистрации спектров рассеяния Рэлея: **а** – опрос оптического волокна на различных длинах волн с регистрацией рефлектограмм при спектральной перестройке источника излучения (P – мощность зондирующего излучения, λ – длина волны источника излучения, Φ – мощность регистрируемого сигнала рэлеевского рассеяния из волокна, t – время); **б** – выделение спектров рассеяния Рэлея из массива зарегистрированных рефлектограмм, изображен спектр для произвольного пространственного канала (d – дальность вдоль оптического волокна; RSS – Rayleigh scattering spectrum); **в** – сопоставление зарегистрированного при исходных условиях спектра рассеяния $\Phi_0(\lambda)$ и спектра $\Phi^*(\lambda)$, зарегистрированного при изменении деформации или температуры, в результате сопоставления определяется величина спектрального смещения δ с последующим ее пересчетом в единицы деформации $\Delta\varepsilon$ или температуры ΔT .

формации обусловили научный интерес к новой технологии.

Следующий этап развития рэлеевских сенсорных систем представлен работами [120, 121]. В качестве перестраиваемого источника излучения экспериментального датчика использовалась система из стабилизированного по частоте лазерного диода с распределенной обратной связью (Distributed Feedback Laser Diode) и однополосного модулятора (Single Sideband Modulator). Была продемонстрирована возможность измерений температуры вдоль одномодового оптического волокна длиной 8 км. При этом пространственное разрешение составляло 1 м, а неопределенность измерений достигала 0.01°C (эквивалентно $0.1 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ в единицах деформации), что в принципе отвечает требованиям широкого ряда практических задач. Указанные характеристики, однако, обеспечивались в ограниченном диапазоне измеряемых воздействий – до $\pm 0.22^\circ\text{C}$ (эквивалентно $\pm 2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ в единицах деформации), при этом время единичного измерения достигало 3 ч, что в большинстве случаев неприемлемо.

Шагом вперед, позволившим несколько расширить диапазон измеряемых воздействий и значительно уменьшить время единичного измерения, стало использование лазерного диода с распределенной обратной связью, ток накачки которого подвергался прямому управлению с целью спектральной перестройки [122]. При длине оптического волокна 1 км и пространственном разрешении 1 м диапазон измеряемой деформации составил $\pm 10 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ (эквивалентно $\pm 1.1^\circ\text{C}$ в единицах температуры), а период регистрации спектров рассеяния Рэлея удалось уменьшить до

1 мс. Вместе с тем за счет аппаратно-алгоритмических ограничений время единичного измерения составляло около 1 с. Применение нейронной сети для обработки спектров рассеяния Рэлея позволило ускорить расчеты, обеспечив измерения в режиме реального времени, при улучшении линейности отклика на внешние воздействия [123].

Существенным обстоятельством, ограничивающим применимость описанных выше устройств для решения практических задач, является узкий диапазон измеряемых воздействий, обусловленный малым интервалом спектральной перестройки излучателя [121]. Практическая невозможность значительно расширить этот интервал для лазерного диода с распределенной обратной связью привела к разработке принципиально иного решения – низкокогерентного излучателя, способного к быстрой перестройке в диапазоне до нескольких нанометров. В работе [124] впервые предложена конструкция такого излучателя, изучены особенности низкокогерентной рефлектометрии с перестраиваемой длиной волны, разработаны схемы низкокогерентных датчиков для измерения деформации и температуры в широком диапазоне величин, экспериментально подтверждена работоспособность указанных схем.

Ключевым звеном разработанной конструкции низкокогерентного излучателя является полосо-пропускающий спектральный фильтр MTF500B производства DiCon Fiberoptics с электронным управлением, перестраиваемый за счет микроэлектромеханической системы. Ширина полосы пропускания фильтра достигает 0.17 нм, диапазон перестройки 1529–1564 нм. На вход

фильтра подается импульсное излучение суперлюминесцентного диода SLD 761 компании Superlum с шириной спектра 40 нм, усиленное при помощи усилителя на основе волокна, легированного эрбием.

Распределенный датчик деформации и температуры с описанным выше излучателем позволяет проводить измерения в диапазоне деформаций $\pm 1000 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ (эквивалентно $\pm 110^\circ\text{C}$). При этом дальность измерений достигает 8 км, пространственное разрешение – 1.2 м, неопределенность измерений – $2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}/0.22^\circ\text{C}$, время единичного измерения 10 мин [124]. Устройством схожей модификации применяется для контроля состояния железнодорожной насыпи на карстоопасном участке в г. Уфе с ноября 2021 года.

Ограничение спектральной полосы фотоприема с помощью дополнительного фильтра, перестраиваемого совместно с фильтром излучателя и установленного непосредственно перед приемником излучения, позволяет увеличить длину измеряемого волокна до 25 км за счет увеличения мощности зондирующего излучения выше порога нелинейных эффектов [125]. Дальнейшее увеличение дальности измерений до 85 км [126] и 100 км [127] осуществимо за счет организации в оптическом волокне рамановского усиления и применения эрбиевых усилителей с удаленной оптической накачкой (Remotely Optically Pumped Amplifier).

Такие свойства, как возможность измерений при дальности до 100 км, лучевая (Single-Ended) архитектура измеряемой оптической трассы, сохранение работоспособности датчика до места обрыва волокна, принципиальное отсутствие эффекта нелокальности измерений, свойственного бриллюэновскому оптическому анализатору во временной области, температурная чувствительность измерений деформации, в 2.5 раза меньшая, чем для бриллюэновских датчиков [124], позволяют низкокогерентным датчикам на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея составить конкурентную альтернативу бриллюэновским датчикам.

В завершение следует отметить, что чувствительность спектров рассеяния Рэлея как к деформации, так и к температуре является общей проблемой для почти всех распределенных датчиков, включая бриллюэновские, а также для датчиков, основанных на применении решеток Брэгга. Радикальное решение проблемы дифференциации воздействий состоит в одновременном использовании двух разнородных физических эффектов. В работе [128] предлагается организация дополнительного рефлектометрического канала на основе регистрации сигнала спонтанного рассеяния Рамана, обнаруживающего выраженную температурную чувствительность при исчезающе

малой чувствительности к деформации [129]. С помощью датчика, построенного по гибридной схеме, продемонстрирована возможность раздельных измерений деформации и температуры вдоль оптического волокна длиной 8 км при пространственном разрешении около 2 м, неопределенности измерения деформации $2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$, температуры – 0.04°C . Полученные результаты отвечают требованиям широкого круга практических задач.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный авторами обзор демонстрирует новейшие достижения в области оптической рефлектометрии, метрологии и сенсорики. Авторы определили четыре направления, в которых, по их мнению, ожидается получение самых интересных результатов в ближайшем будущем. Это распределенные акустические датчики на основе рассеяния Рэлея, средства измерений и сенсорики на основе бриллюэновской оптической рефлектометрии и анализа во временной области, когерентной фазочувствительной рефлектометрии в частотной области, а также низкокогерентной рефлектометрии. В качестве общих важнейших тенденций, охвативших все четыре направления исследования, необходимо отметить работы по внедрению новейших способов пост-процессинга данных, в том числе методов искусственного интеллекта и машинного обучения, в цепочки алгоритмической обработки информации, полученной с устройств такого типа.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Туров А.Т. – глава 1; Барков Ф.Л. – главы 2, 3; Константинов Ю.А. – глава 3; Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э. – глава 4; Zinan Wang, Zhiyong Zhao, Mohd Saiful Dzulkefly Zan, Колесниченко Е.В. – работа с текстом, вычитка, дискуссии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Главы 1–3 выполнены в рамках государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurtz S., Haegel N., Sinton R., Margolis R. // *Nature Photon.* 2017. V. 11. P. 3. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.268>
2. Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R. // *Opt. Express.* 2018. V. 26. P. 24190. <https://doi.org/10.1364/OE.26.024190>

3. Liu X. // *iScience* 2019. V. 22. P. 489.
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.026>
4. Bourdine A.V., Barashkin A.Y., Burdin V.A., Dashkov M.V., Demidov V.V., Dukelskii K.V., Evtushenko A.S., Ismail Y., Khokhlov A.V., Kuznetsov A.A., Matrosova A.S., Morozov O.G., Pchelkin G.A., Petruccione F., Sakhabutdinov A.Z. et al. // *Fibers*. 2021. V. 9. P. 27.
<https://doi.org/10.3390/fib9050027>
5. Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Клод Д., Латкин К.П., Белокрылов М.Е., Кривошеев А.И., Цибиногина М.К. // ПТЭ. 2021. № 5. С. 138.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221050037>
6. Bobkov K.K., Mikhailov E.K., Zaushitsyna T.S., Rybalovsky A.A., Aleshkina S.S., Melkumov M.A., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Abramov A.N., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Likhachev M.E. // *Journal of Lightwave Technology*. 2022. V. 40. P. 6230.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3191862>
7. Ibrahim A.A., Fouad M.M., Hamdi A.A. // *Electronics*. 2022. V. 11. P. 3627.
<https://doi.org/10.3390/electronics11213627>
8. Liu L., Wang L. On Line Monitoring System of Power Optical Fiber Transmission Network Under Internet of Things Technology. // *Multimedia Technology and Enhanced Learning. ICMTEL 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Switzerland, Cham: Springer, 2022. V. 446. P. 3.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-18123-8_1
9. Stepanov K.V., Zhimov A.A., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Khan R.I., Pnev A.B. // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 7077.
<https://doi.org/10.3390/s21217077>
10. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. // *Sensors*. 2023. V. 23. P. 410.
<https://doi.org/10.3390/s23010410>
11. Hussein S.M., Sakhabutdinov R.H., Morozov O.G., Anfinogentov V.I., Tupolev A.N., Tunakova J.A., Shagidullin A.R., Kuznetsov A.A., Lipatnikov K.A., Nasybullin A.R. // *Karbala International Journal of Modern Science*. 2022. V. 8. Iss. 3. P. 2405
<https://doi.org/10.33640/2405-609X.3243>
12. Anoshkin A.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shardakov I.N., Shipunov G.S. // *Mech. Solids*. 2016. V. 51. P. 542.
<https://doi.org/10.3103/S0025654416050058>
13. Hartog A.H. Distributed Sensors in the Oil and Gas Industry. Chapter 6. Hartog Book. First published: 05 October 2020.
<https://doi.org/10.1002/9781119534730.ch6>
14. Кривошеев А.И., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е. // ПТЭ. 2022. № 5. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222050275>
15. Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Ponomarev R.S. // *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2022. V. 11. № 4. P. 249.
<https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.4.249-261>
16. Tkachenko A.Yu., Lobach I.A., Kablukov S.I. // *Quantum Electronics*. 2019. V. 49. P. 1121.
<https://doi.org/10.1070/QEL17165>
17. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhimov 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>
18. Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Латкин К.П., Клод Д., Селезнев Д.А., Степин А.А., Кокин Ю.А., ЩербакOVA В.А., Кашина Р.Р. // ПТЭ. 2020. № 4. С. 45.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050018>
19. Jiang J., Xiong J., Wang Y., Wang P., Zhang J., Liang Y., Sun J., Wang Z. // *Journal of Lightwave Technology*. 2022. V. 40. Iss. 5. P. 5337.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3173624>
20. Sirin S., Aldogan K.Y., Wuilpart M. // *Optical Fiber Technology*. 2022. V. 74. P. 103084.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103084>
21. Fu Y., Xue N., Wang Z., Zhang B., Xiong J., Rao Y. // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V. 36. Iss. 4. P. 1069.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2768587>
22. Kocal E.B., Wuilpart M., Yüksel K. // *Optical Fiber Technology*. 2023. V. 75. P. 103176.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103176>
23. Xue N., Fu Y., Lu C., Xiong J., Yang L., Wang Z. // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V. 36. Iss. 23. P. 5481.
<https://doi.org/10.1109/jlt.2018.2875086>
24. Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Simikin D.E., Taranov M.A., Zhukov K.M., Potapov V.T. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 9482.
<https://doi.org/10.3390/s22239482>
25. Wang Z., Zhang B., Xiong J., Fu Y., Lin S., Jiang J., Chen Y., Wu Y., Meng Q., Rao Y. // *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. V. 6. Iss. 4. P. 6117.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869474>
26. He H., Zhao Z., Fu S., Liu D., Tang M. // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. P. 3403.
<https://doi.org/10.1364/OL.458100>
27. He H., Wei W., Zhao Z., Fu S., Liu D., Tang M. // *Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest Series*. 2022. Paper SF2F.7.
https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2022.SF2F.7
28. Zheng H., Yan Y., Zhao Z., Zhu T., Zhang J., Guo N., Lu C. // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. Iss. 22. P. 25723.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3117287>
29. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 2677.
<https://doi.org/10.3390/s22072677>
30. Zan M.S.D., Almoosa A.S.K., Ibrahim M.F., Elgaud M.M., Hamzah A.E., Arsad N., Mokhtar M.H.H., Bakar A.A.A. // *Optical Fiber Technology*. 2022. V. 72. Art. № 102977.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102977>
31. Almoosa A.S.K., Hamzah A.E., Zan M.S.D., Ibrahim M.F., Arsad N., Elgaud M.M. // *Optical Fiber Technology*. 2022. V. 70. Art. № 102860.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102860>
32. Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Babin S.A., Tsydenzhapov I.B., Shelemba I.S. // *Quantum Electronics*. 2017. V. 47. Iss. 10. P. 967.
<https://doi.org/10.1070/QEL16436>

33. Wang Z., Gong H., Xiong M., Zhang J. // 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN). 2016. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICOCN.2016.7875804>
34. Minardo A., Bernini R., Ruiz-Lombera R., Mirapeix J., Lopez-Higuera J.M., Zeni L. // Opt. Express. 2016. V. 24. P. 29994.
<https://doi.org/10.1364/oe.24.029994>
35. Mohamed A.Y., Nöther N. // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors. OSA Technical Digest. 2018. Paper TuE22.
<https://doi.org/10.1364/OFS.2018.TuE22>
36. Ruiz-Lombera R., Minardo A., Bernini R., Mirapeix J., Lopez-Higuera J.M., Zeni L. // Proc. SPIE 10323. 25th International Conference on Optical Fiber Sensors. 103238L. Jeju, Korea (South), 2017.
<https://doi.org/10.1117/12.2265733>
37. Xing Z., Shi B., Zhu H.H., Zhang C.C., Wang X., Sun M.Y. // Geomechanics and Engineering 24. 2021. V. 4. P. 337.
<https://doi.org/10.12989/GAE.2021.24.4.337>
38. Zhang Q., Xiong Z. // Shock and Vibration. 2018. V. 2018. Article ID 6563537.
<https://doi.org/10.1155/2018/6563537>
39. Wosniok A., Mizuno Y., Krebber K., Nakamura K. // Proc. SPIE 8794. Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors. 2013.
<https://doi.org/10.1117/12.2025378>
40. Karapanagiotis C., Hicke K., Wosniok A., Krebber K. // Opt. Express. 2022. V. 30. P. 12484.
<https://doi.org/10.1364/OE.453906>
41. Hartog A., Frignet B., Mackie D., Clark M. // Geophysical Prospecting. Vertical Seismic Profiling and Microseismicity Frontiers. V. 62. Iss. 4. 2014. P. 693.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.12141>
42. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M., Miller D.E. // European Association of Geoscientists & Engineers. July 2013.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131303>
43. Liu Q., Liu T., He T., Li H., Yan Z., Zhang L., Sun Q. // Optics Express. 2021. V. 29. Iss. 8. P. 11538.
<https://doi.org/10.1364/OE.412935>
44. Rena L., Jianga T., Jia Z., Li D., Yuan C., Li H. // Measurement. 2018. V. 122. P. 57.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.018>
45. Peng Z., Jian J., Wen H., Gribok A., Wang M., Liu H., Huang S., Mao Z.H., Chen K.P. // Optics Express. 2020. V. 28. Iss. 19. P. 27277.
<https://doi.org/10.1364/OE.397509>
46. MacLeana A., Morana C., Johnstone W., Culshaw B., Marsh D., Parker P. // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. V. 109. Iss. 1–2. P. 60.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.09.007>
47. Bakhom E.G., Zhang C., Cheng M.H. // Aerospace. 2020. V. 7. Iss. 9. P. 125.
<https://doi.org/10.3390/aerospace7090125>
48. Chen M., Li B., Masoudi A., Bull D., Barton J.M. // 2020 International Conference on Intelligent Transportation. Big Data & Smart City (ICITBS). IEEE, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00030>
49. Li Z., Zhang J., Wang M., Zhong Y., Peng F. // Optics express. 2020. V. 28. Iss. 3. P. 2925.
<https://doi.org/10.1364/OE.28.002925>
50. Taylor H.F., Lee C.E. Patent USA № 5194847. 1993.
51. Wang B., Mao Y., Ashry I., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T.K., Yu C., Ooi B.S. // Sensors. 2021. V. 21. Iss. 5. P. 1592.
<https://doi.org/10.3390/s21051592>
52. Barnoski M.K., Jensen S.M. // Applied optics. 1976. V. 15. Iss. 9. P. 2112.
<https://doi.org/10.1364/AO.15.002112>
53. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. // Applied Physics Reviews. 2019. V. 6. № 4. P. 041302.
<https://doi.org/10.1063/1.5113955>
54. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, 2013.
55. Shimada S. Coherent Lightwave Communications Technology. Springer Science & Business Media, 2012.
56. Hui R. O'Sullivan M. Fiber Optic Measurement Techniques. Academic Press, 2009.
57. Bucaro J.A., Dardy H.D., Carome E.F. // Applied optics. 1977. V. 16. Iss. 7. P. 1761.
<https://doi.org/10.1364/AO.16.001761>
58. Palmieri L., Schenato L. // The Open Optics Journal. 2013. V. 7. Iss. 1.
<https://doi.org/10.2174/1874328501307010104>
59. Laferrie're J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. Reference Guide to Fiber Optic Testing. JDS Uniphase Corporation. 2007.
60. Healey P., Malyon D.J. // Electronics Letters. 1982. V. 20. Iss. 18. P. 862.
<https://doi.org/10.1049/el:19820585>
61. Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X. // Journal of Lightwave Technology. 2010. V. 28. Iss. 22. P. 3243.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2078798>
62. Туров А.Т., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е., Максимов А.Ю. // Фотон-экспресс. 2021. № 6. С. 383.
<https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-383-384>
63. Xiong J., Wang Z., Wu Y., Wu H., Rao Y. // Optics Express. 2020. V. 28. Iss. 24. P. 35844.
<https://doi.org/10.1364/OE.403951>
64. Tomboza W., Guerrier S., Awwad E., Dorize C. // IEEE Photonics Technology Letters. 2021. V. 33. Iss. 13. P. 645.
<https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3084557>
65. Туров А.Т., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е., Максимов А.Ю. // Прикладная фотоника. 2021. Т. 8. Вып. 2. С. 33.
<https://doi.org/10.15593/2411-4367/2021.2.03>
66. Jiang F., Lu Z., Cai F., Li H., Zhang Z., Zhang Y., Zhang X. // Sensors. 2019. V. 19. Iss.17. P. 3753.
<https://doi.org/10.3390/s19173753>
67. Che Q., Wen H., Li X., Peng Z., Chen K.P. // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 101758.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931040>
68. Zhao Y., Li Y., Wu N. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. V. 60. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3042202>

69. Yang L., Fomel S., Wang S., Xiaohong C., Wei C., Omar S., Yangkang C. // *Geophysics*. 2022. V. 88. Iss. 1. P. 1. <https://doi.org/10.1190/geo2022-0138.1>
70. Kowarik S., Hussels M.-T., Chruscicki S., Münzenberger S., Lämmerhirt A., Pohl P., Schubert M. // *Sensors*. 020. V. 20. Iss. 2. P. 450. <https://doi.org/10.3390/s20020450>
71. Ashry I., Wang B., Mao Y., Sait M., Guo Y., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T.K., Ooi B.S. // *Sensors*. 2022. V. 22. Iss. 17. P. 6491. <https://doi.org/10.3390/s22176491>
72. Ding Y., Tian Y., Ozharar S., Jiang Z., Wang T. // *Optical Sensors*. 2022. Paper SM2C.7 <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2022.SM2C.7>
73. Berghmans F., Dudley J., Février S., Geernaert T., Genty G., Gonzalez-Herraez M., Hotoleanu M., Kalli K., Marhic M., Sylvestre T., Thévenaz L., Tur M., Webb D., Wuilpart M. *Advanced Fiber Optics: Concepts and Technology*. 2011.
74. Motil A., Bergman A., Tur M. // *Optics & Laser Technology*. 2016. V. 78. P. 81. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013>
75. Bao X., Webb D.J., Jackson D.A. // *Optics Letters*. 1993. V. 18. Iss. 18. P. 1561. <https://doi.org/10.1364/ol.18.001561>
76. Soto M.A., Thévenaz L. // *Optics Express*. 2013. V. 21. Iss. 25. P. 31347. <https://doi.org/10.1364/OE.21.031347>
77. Urricelqui J., Sagues M., Loayssa A. // *Optics Express*. 2014. V. 22. Iss. 15. P. 18195. <https://doi.org/10.1364/OE.22.018195>
78. Feng C., Preussler S., Emad J., Schneider T. // *Sensors*. 2019. V. 19. Iss. 13. <https://doi.org/10.3390/s19132878>
79. Gyger F., Yang Z., Soto M.A., Yang F., Tow K.H., Thévenaz L. // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors OSA Technical Digest. SwissTech Convention Center, 2018. Paper ThE69. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE69>
80. Zhou F., Gan J., Lv H., Cui L. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Banda Aceh, Indonesia, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/3/032025>
81. López-Gil A., Domínguez-López A., Martín-López S., Gonzalez-Herraez M. // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. Santander, Spain, 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2059522>
82. Feng C., Lu X., Preussler S., Schneider T. // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. V. 37. Iss. 20. P. 5231. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2930919>
83. Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. // *Optics Letters*. 2011. V. 36. Iss. 21. P. 4275. <https://doi.org/10.1364/OL.36.004275>
84. Xiao Z., Yuan Z., Zhang Y., Huang Y., Xi L., Xu S., Shan L., Li X. // *Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC) OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020)*. Paper M4A.75. <https://doi.org/10.1364/ACPC.2020.M4A.75>
85. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. // *Fibers*. 2020. V. 8. Iss. 9. P. 60. <https://doi.org/10.3390/fib8090060>
86. Haneef S.M., Yang Z., Thévenaz L., Venkitesh D., Srinivasan B. // *Optics Express*. 2018. V. 26. Iss. 11. P. 14661. <https://doi.org/10.1364/OE.26.014661>
87. Li Y., Wang J. // *Optical Fiber Technology*. 2020. V. 58. P. 102314. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102314>
88. Nordin N.D., Zan M.S.D., Abdullah F. // *Optical Fiber Technology*. 2020. V. 58. P. 102298. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102298>
89. Wu H., Wang L., Zhao Z., Shu C., Lu C. // *IEEE Photonics Journal*. 2018. V. 10. Iss. 4. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2858235>
90. Smith J., Brown A., Merchant M.D., Bao X. // *Optics Communications*. 1999. V. 168. Iss. 5–6. P. 393. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00366-1](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00366-1)
91. Bao X., Brown A., DeMerchant M., Smith J. // *Optics Letters*. 1999. V. 24. Iss. 8. P. 510. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000510>
92. Bao X., Zhou Z., Wang Y. // *PhotonIX*. 2021. V. 2. Article number. 14. <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00038-w>
93. Li M., Xu T., Wang S., Hu W., Jiang J., Liu T. // *Special Issue: Optical Communications, Sensing, and Laser Applications*. 2022. V. 16. Iss. 6. P. 238. <https://doi.org/10.1049/ote2.12081>
94. Bernini R., Minardo A., Zeni L. // *IEEE Photonics Journal*. 2012. V. 4. Iss. 1. P. 48. <https://doi.org/10.1109/jphot.2011.2179024>
95. Li W., Bao X., Li Y., Chen L. // *Optics Express*. 2008. V. 16. Iss. 26. P. 21616. <https://doi.org/10.1364/oe.16.021616>
96. Headley C., Agrawal G.P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-044506-6.X5000-2>
97. Taki M., Muanenda Y., Oton C.J., Nannipieri T., Signorini A., Di Pasquale F. // *Optics Letters*. 2013. V. 38. Iss. 15. P. 2877. <https://doi.org/10.1364/ol.38.002877>
98. Taki M., Signorini A., Oton C.J., Nannipieri T., Di Pasquale F. // *Optics Letters*. 2013. V. 38. Iss. 20. P. 4162. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004162>
99. Wait P.C., Newson T.P. // *Optics Communications*. 1996. V. 122. Iss. 4–6. P. 141. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00557-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00557-9)
100. Li A., Wang Y., Fang J., Li M., Kim B.Y., Shieh W. // *Optics Letters*. 2015. V. 40. Iss. 7. P. 1488. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001488>
101. Hu L., Sheng L., Yan J., Li L., Yuan M., Sun F. Nian F., Li L., Liu J., Zhou S., Liu Z. // *International Journal of Optics*. 2021. V. 4. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2021/6610674>
102. Galindez C., Madruga F.J., Lopez-Higuera J.M. // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2008. V. 20. Iss. 23. P. 1959. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2005530>

103. Méndez A., Diatzikis E. // Optical Fiber Sensors OSA Technical Digest. Optica Publishing Group, 2006. Paper ThE46.
<https://doi.org/10.1364/OFS.2006.ThE46>
104. Bİlgen M., GÜnday A. // 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). Bursa, Turkey, 2022.
<https://doi.org/10.23919/ELECO54474.2021.9677862>
105. Barkov F., Konstantinov Y., Sycheva S.D., Smetannikov O., Smirnov A.S., Burdin V., Krivosheev A.I., Nosova E. // Quantum Electronics. 2019. V. 49. Iss. 5. P. 514.
<https://doi.org/10.1070/QEL16832>
106. Schenato L. // Applied Sciences. 2017. V. 7. Iss. 9.
<https://doi.org/10.3390/app7090896>
107. Ding Z., Wang C., Liu K., Jiang J., Yang D., Pan G., Pu Z., Liu T. // Sensors. 2018. V. 18. Iss. 4. P. 1072.
<https://doi.org/10.3390/s18041072>
108. Ponomarev R., Konstantinov Y., Belokrylov M., Lobach I., Shevtsov D. // Appl. Sci. 2021. V. 11. Iss. 21. P. 9853.
<https://doi.org/10.3390/app11219853>
109. Цифровая обработка сигналов. Глава 3. Цифровой спектральный анализ методом ДПФ. Лекция 4 февраля 2019 г. МФТИ.
https://kprf.mipt.ru/attachments/article/65/лекция_18_февраля_2019.pdf
110. Функции оконного сглаживания. [Электронный ресурс] <https://ru.dsplib.org/content/windows/windows.html> Дата обращения: 15.01.2023
111. Zhao S., Cui J., Tan J. // Sensors. 2019. V. 19. Iss. 17. P. 3660.
<https://doi.org/10.3390/s19173660>
112. Zhong H., Fua C., Wang L., Du B., Li P., Meng Y., Chen L., Du C., Wang Y. // Optics and Lasers in Engineering. 2023. V. 161. P. 107341.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107341>
113. Guo Z., Han G., Yan J., Greenwood D., Marco J., Yu Y. // Sensors. 2021. V. 21. Iss. 14. P. 4632.
<https://doi.org/10.3390/s21144632>
114. Wang F., Sun Y., Chen Q., Xing J., Xia Y., Zhang Y., Zhang X. // Journal of Lightwave Technology. 2022. V. 40. Iss. 1.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3119214>
115. Yuksel K., Moeyaert V., Megret P., Wuilpart M. // IEEE Sensors Journal. 2012. V. 12. Iss. 5. P. 988.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2167142>
116. Zhao S., Cui J., Wu Z., Wang Z., Tan J. // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. Iss. 12. P. 4101.
<https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3055576>
117. Murayama H., Igawa H., Omichi K., Machijima Y. // 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Ottawa, Canada, 2021.
<https://doi.org/10.1117/12.886028>
118. Matveenko V.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Gusev G.N. // Procedia Structural Integrity. 2021. V. 33. P. 925.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.103>
119. Froggatt M., Moore J. // Appl. Opt. 1998. V. 37. Iss. 10. P. 1735.
<https://doi.org/10.1364/ao.37.001735>
120. Imahama M., Koyamada Y., Hogari K. // IEICE Trans. Commun. 2008. V. E91-B. Iss. 4. P. 1243.
<https://doi.org/10.1093/ietcom/e91-b.4.1243>
121. Koyamada Y., Imahama M., Kubota K., Hogari K. // J. Lightw. Technol. 2009. V. 27. Iss. 9. P. 1142.
<https://doi.org/10.1109/jlt.2008.928957>
122. Liehr S., Münzenberger S., Krebber K. // Opt. Express. 2018. V. 26. Iss. 8. P. 10573.
<https://doi.org/10.1364/oe.26.010573>
123. Liehr S., Jäger L.A., Karapanagiotis C., Münzenberger S., Kowarik S. // Opt. Express. 2019. V. 27. Iss. 5. P. 7405.
<https://doi.org/10.1364/oe.27.007405>
124. Gorshkov B.G., Taranov M.A., Alekseev A.E. // Laser Phys. 2017. V. 27. Iss. 8. P. 085105.
<https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa792f>
125. Gorshkov B.G., Taranov M.A. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. Iss. 11. P. 115108.
<https://doi.org/10.1088/1612-202x/aad991>
126. Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э. // ПТЭ. 2020. № 4. С. 96.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220040187>
127. Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Potapov V.T. // Appl. Opt. 2021. V. 60. Iss. 11. P. 3049.
<https://doi.org/10.1364/ao.419837>
128. Gorshkov B.G., Taranov M.A. // Quantum Electronics. 2018. V. 48. № 2. P. 184.
<https://doi.org/10.1070/QEL16541>
129. Gorshkov B.G., Gorshkov G.B., Taranov M.A. // Laser Phys. Lett. 2016. V. 14. № 1. P. 015103.
<https://doi.org/10.1088/1612-202x/14/1/015103>