

ЭКСКУРСИЯ ПО РЕФЛЕКТОГРАММЕ *

Ю.А. Константинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Константинов Ю.А. Экскурсия по рефлектограмме // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 3. – С. 32–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.3.3>

В данной статье в научно-популярной форме изложены основные принципы распределенных измерений для нужд метрологии и сенсорики, проводимых с помощью методов оптической рефлектометрии временной области и оптической рефлектометрии частотной области. Статья вводит читателя в курс работ лаборатории фотоники «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»).

Ключевые слова: *рефлектометрия, распределённые измерения, волоконно-оптические датчики, фотоника.*

Те из нас, кто постарше, прекрасно помнят, каким был предыдущий век с точки зрения научной романтики: первый искусственный спутник Земли, полёт человека в космос, пилотируемая миссия на Луну, активное исследование Солнечной системы. Мы всё время смотрели в небо, выискивая телескопами ответы на все наши вопросы в тёмной синеве, а целые поколения детей по всему миру мечтали пилотировать звездолёты и осваивать мир за пределами нашего «синего шарика». Об этом пророчили со страниц книг и киноэкранов Герберт Уэллс, братья Стругацкие и Станислав Лем, и всё шло к тому, что уже в следующем столетии ужин с коллегами-марсианами в кафе на Энцеладе станет обыденностью. На деле же – мы, люди, пустились в гонку за количеством транзисторов в одной микросхеме и поселились в виртуальном мире, сменив стёкла телескопов на стёкла экранов гаджетов. Сами

же небозрительные инструменты, пройдя свой романтический пик популярности, сначала остались лишь увлечением одиночек, а потом и вовсе покрылись чердачной пылью прошлого. Неужели самый романтический исследовательский инструмент ушёл так скоро и неожиданно, не оставив преемника? «Конечно, оставил!» – ответит на этот вопрос любой практикующий и увлечённый учёный и тут же начнёт отстаивать неоспоримые преимущества именно своего «боевого орудия». Биолог непременно погрузит задавшего вопрос в свой микромир, открываемый им родимым МБС-10, электронщик же сразу позовёт, как к телевизору в прайм-тайм, к любимому осциллографу. Сколько исследователей, столько и мнений. А вот некоторые фотоники, уже сделавшие свой выбор и не изменявшие ему много лет, могут вполне закономерно назвать одно малоизвестное слово: рефлектометр.

* Работа выполнена в рамках Государственного задания № 124020600009-2

Как известно, все значительные научно-технические новшества были предсказаны писателями. Не стал исключением и этот самый прибор, фактически описанный Даниилом Граниным в романе «Искатели» во время его учёбы в аспирантуре Ленинградского политехнического института. В книге повествуется о некотором «локаторе», который способен находить места повреждений кабельных линий, что было крайне важно во время энергетического бума в СССР. Рефлектометр для электрических кабелей тем не менее не стал объектом интереса для исследователей, а так и остался рутинным инструментом технического и инженерного персонала – например, монтажников локальных компьютерных сетей. И уже только его «младший брат», представляющий исследователю возможность «заглянуть» в длинное и тонкое оптическое волокно, как в замочную скважину, стал регулярным гостем научных журналов серии Nature.

Почему это так важно? Зачем нужно заглядывать в оптическое волокно и кому это нужно? Итак, обо всём по порядку. Оптическое волокно – это такая тоненькая кварцевая и/или полимерная нить, структура которой позволяет передавать по ней оптическое излучение различных диапазонов. Большинство оптических волокон работает по принципу полного внутреннего

отражения, который был продемонстрирован Джоном Тиндалем королеве Великобритании в 1870 г. Мы же можем видеть опыт британского физика, подойдя к любому светомузыкальному фонтану и наблюдая, как световой луч сохраняется внутри струи воды, отражаясь от границы раздела сред (рис. 1). Так оптическое волокно и «хранит» в себе излучение.

Необходимость «заглядывать» в оптические волокна появилась на самом деле не от хорошей жизни: на заре волоконно-оптических технологий процессы их изготовления были довольно трудно управляемыми, сама процедура и исходные материалы – дорогостоящими. Именно поэтому исследователи-волоконщики по всему миру тогда были гранинскими «искателями» – они в самом прямом смысле искали дефекты в оптическом волокне, после этого корректировали технологический процесс, снова исследовали и снова искали...

Как же работал этот самый таинственный рефлектометр? Представим, что туристы поздним вечером подошли к глубокому ущелью. Ребята подустали, да и темнота не подталкивает к тому, чтобы серьезно обдумывать, как его преодолеть. Тем не менее, туристам хочется хотя бы приблизительно оценить, насколько оно глубокое. Кто-то из них сразу крикнет в него какое-нибудь короткое и энергетически ёмкое

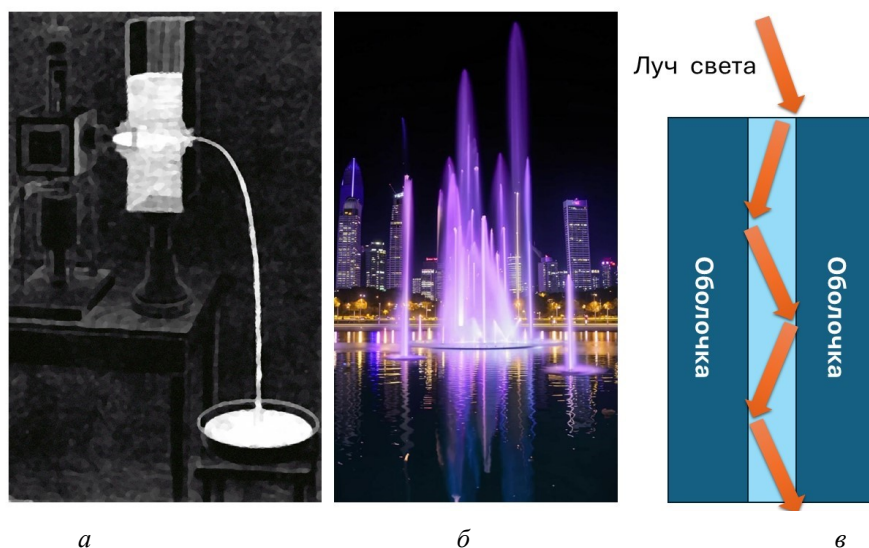


Рис. 1. (а) – опыт Тиндаля (1870 г.); полное внутреннее отражение в воде (б) и оптическом волокне (в)

слово и тут же начнёт прислушиваться – как будет отражаться эхо. Кто-то возьмёт маленький камень или монетку и, бросив вниз, тоже сконцентрирует свой слух. По сути, так мы повторяем опыт братьев наших меньших – летучих мышей, снабжённых природным радаром и способных по времени возвращения зондирующего сигнала понять – каково расстояние до ближайшей преграды. Так работает и самый простой рефлектометр – он посылает в волокно короткий всплеск оптического сигнала и тут же «замолкает», «сосредотачиваясь» на получении информации своим чутким детектором. За время путешествия этого короткого всплеска света по волокну «чуткий детектор» может определить не только то место, где кончается оптическое волокно («дно впадины» – на техническом жаргоне эта локация так и называется – «донный импульс»), но и как этот свет отражается от каждого фрагмента этой тонкой световедущей нити. Это и помогает оценить качество оптического волокна в каждой его точке по сей день – стандартные волокна для оптической связи технологии научились производить очень качественно и стабильно, а вот различные сложные образцы со специальной конструкцией учёные разрабатывают постоянно, поэтому метод остался по-прежнему востребованным [3]. Поскольку метод оперировал величинами времени, его так и назвали –

оптическая рефлектометрия во временной области (англ. Optical time domain reflectometry – OTDR). На рис. 2 представлена типичная рефлектограмма оптического волокна во временной области.

Видно, как сигнал ввиду естественных потерь интенсивности к концу линии становится менее мощным. Наклон рефлектограммы определяет коэффициент затухания оптического сигнала. В современных одномодовых оптических волокнах он не превышает 0,16 дБ/км. Длина оптического волокна определяется расстоянием до резкого всплеска интенсивности, обусловленного отражением излучения от границы раздела сред: кварц и воздух. Также на рефлектограмме видны различные неоднородности, распределение которых по длине может свидетельствовать о дефектах технологии изготовления волокна или укладки волокна в оптический кабель.

Однако, что удивительно, самые интересные свои применения оптическая рефлектометрия нашла за пределами заводской лаборатории. Как только человечество начало широко эксплуатировать оптические волокна для передачи данных, обнаружили их отрицательные и вместе с тем интересные с точки зрения перспектив свойства: они чрезвычайно чувствительны к любым воздействиям, которые на них оказываются. Сигнал, передаваемый по волокнам, менялся по интенсивности, спек-

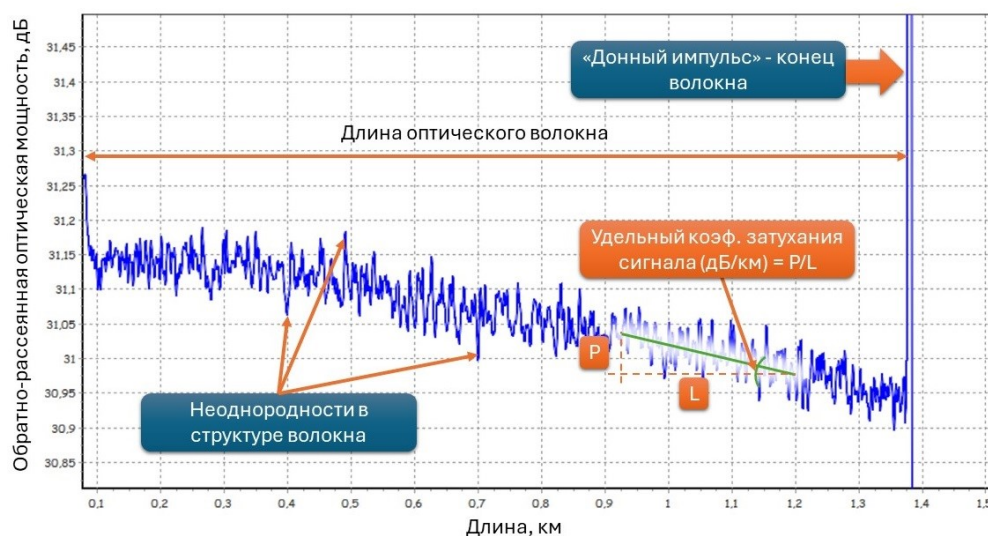


Рис.2. Типичная рефлектограмма оптического волокна во временной области в составе кабеля

трально, после воздействия становилось другим состояние поляризации, фаза и многие другие параметры. Всё это очень сильно искажало передаваемую информацию, поэтому основная часть научно-технического сообщества, занятая в отрасли, продолжила искать способы вибро-, тепло- и другой изоляции оптических волокон в кабелях, оберегая их от встреч с автомобилями, проезжающими неподалёку, тракторами и даже вездесущими полевыми мышами; в то время как группа энтузиастов (на тот момент малая) попыталась обернуть этот недостаток в преимущество и сделать из оптического волокна настоящий распределённый «нерв». Спустя десятилетия можно заключить, что доли средств и исследователей, занятых в телекоммуникациях и в сенсорике, если не поменялись местами, то существенно выровнялись.

Объяснить это можно тем, что основные заказчики крупных сенсорных исследований в наши дни – национальные и транснациональные сырьевые компании [4, 5]. Нефть и газ нужно добывать эффективно и безопасно, а потом так же эффективно и безопасно транспортировать. Всё это позволяет та самая волоконно-оптическая «ниточка», закреплённая в шахте, на трубопроводе. Так мы можем видеть не только температурные и деформационные поля в каждой точке объекта, на котором закреплено оптическое волокно, но и в прямом смысле его, этот объект, слышать. Если сенсор позволяет регистрировать деформации достаточно быстро, такое многокилометровое «ухо» может улавливать звук в каждой своей точке. Если система «слушает» газопровод, то такая информация позволяет определить, какова активность около самой трубы на всём её протяжении – нет ли врезки, диверсии или техногенной катастрофы. Классифицировать данные позволяют вездесущие и постоянно прогрессирующие нейронные сети: ещё 10 лет назад они с трудом отличали звук копки экскаватором от композиции в стиле хеви-метал, сегодня же они успешно классифицируют проезжающие мимо автомобили, а

иные и поломки машин по спектральному составу оценить могут. Кстати, дефектоскопия – ещё одно популярное применение распределённых волоконно-оптических датчиков. Если что-то где-то сломалось, значит, оно гудит, звенит, воет – либо при штатной работе, либо при виброиспытании. На вопросы «что» и «как» с лёгкостью ответит точечный акустический пьезодатчик или микрофон, а вот по поводу вопроса «где» может дать информацию только волоконный чувствительный элемент. Таким образом устройство, прибор или узел какой-либо системы с интегрированным оптическим волокном позволяет построить детальную акустическую картину и по ней определить поломки, потенциальные проблемы при эксплуатации [6]. Распределённые волоконно-оптические датчики уже участвуют в процессе регистрации голоса для его дальнейшего распознавания [7, 8] и даже детектируют полчища мигрирующих под корой пальм красных долгоносиков [9, 10]. Что уж говорить о нарушителях границ и важных периметров – такие сенсоры находят незваных гостей достаточно легко, причём на дальностях до десятков и даже сотен километров.

Но, как выяснилось, далеко не всегда исследователям нужны огромные длины сенсоров. Зачастую стоят задачи, когда несколько метров оптического волокна нужно прикрепить к достаточно компактному объекту, чтобы изучить его свойства с разрешением в несколько десятков микрон. Зачем нужно такое высокое разрешение? Таким образом, например, учёные-механики верифицируют свои модели поведения новых материалов и конструкций в разных температурных и деформационных полях. Но как добиться такой точности по пространственной координате? Если снова рассмотреть ситуацию с туристом, который крикнул своё бравое «Ура!» в тёмную пустоту, то несложно заметить, что метод будет хорошо работать только в том случае, если ущелье действительно очень глубокое. Если голос достигнет дна через несколько метров, то эхо придёт назад практически одновременно с

исходным сигналом. Конечно, любознательный турист может попрактиковаться и как можно сильнее сократить свой возглас, оставив, там, например, всего лишь одну короткую гласную «А!», но это вряд ли поможет. Здесь туристы оказались «заложниками минимальной длительности звука», а рефлектометристы, которые также работают во временной области, в этом случае назвали бы себя «заложниками длительности импульса». Таким образом, рефлектометром, работающим во временной области, мы не сможем разглядеть события воздействия на сенсор мельче, чем длина его импульса. Конечно, сделать короткий импульс можно, но тут в дело вступают уже другие оптоэлектронные тонкости, которые лучше пока оставить за рамками этой статьи.

И тут, представим, один из туристов появляется из палатки и говорит, что «сейчас всё устроит». Он весел, горяч (разумеется, немного «под градусом») и как никто желает в данный момент что-то спеть. Он подходит к краю обрыва и начинает свою заунывную песню, больше похожую на вой сирены. После этого он вслушивается в пустоту и, так ничего и не поняв, с грустным видом снова исчезает в палатке. Неизвестно, что натолкнуло парня на такую мысль – то ли будоражащий кровь горячительный напиток, то ли всплывшая в памяти лекция, на которой преподаватель объяснял странный и с первого взгляда непонятный метод зондирования коротких фрагментов оптических волокон. Так или иначе, мыслил он верно. Так что это за метод, который преподаватель так надёжно записал своему студенту в подсознание? Сорок с лишним лет назад два немецких физика – Эйхопф и Ульрих – тоже задумались о проблемах пространственного разрешения во временной области и решили больше не зондировать волокна импульсами, направив в них непрерывное излучение, меняющееся по частоте [11]. Да-да, именно как тот самый умозрительный студент-турист с «песней-сиреной» четыре десятилетия спустя, но только в области световых частот, а не звуковых. Что это дало? Множественные интерференции в каждой точке пространства, частот-

ные характеристики которых определяются расстоянием до лазера. Почувствовать такие множественные интерференции можно, слушая, как патрульная машина с включённой сиреной движется по уснувшему городу. Представьте, как в ночной тиши вдруг неожиданно появляется целое море сирен, и разум тут же начинает рисовать сцены из американских фильмов или компьютерных игр, где уличного гонщика преследует не один десяток патрульных экипажей. Вам становится интересно, Вы вглядываетесь с балкона высотки вдаль и видите, как по пустому проспекту, поблёскивая маячками, одиноко едет всего один полицейский автомобиль. Почему так происходит? Потому что звук сирены отражается от стен домов, конструкций, заборов в разных местах, в разное время и, как и свет в разных точках волокна, к наблюдателю (детектору) возвращается в виде частотных наложений (интерференций). Сирена, как и свет лазера, является непрерывной, и поэтому в «заложники» импульсу (которого здесь попросту нет) взять больше никого не удастся. Однако, чтобы понять, какое именно эхо этой сирены отразилось от той или иной пространственной неоднородности, нужен некоторый сигнал-эталон. В рефлектометрах для этого используют специальное зеркало, отражающее часть излучения лазера для дальнейшего смешивания с вернувшимся назад сигналом. Так можно исследовать характеристики оптических волокон и компонентов с очень высоким разрешением по длине (порядка десятков микрон) и, самое главное, воспринимать таким оптическим волокном различные воздействия. Этот метод, получивший название оптической рефлектометрии частотной области (англ. Optical Frequency Domain Reflectometer – OFDR), не только применяется в наши дни для построения температурных и деформационных полей объектов, но и позволяет делать волокна сенсорами формы, которые могут её оценивать, когда визуальный контроль над объектом невозможен [12].

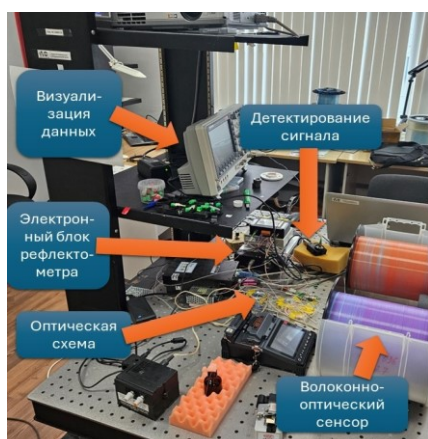
Необходимо отметить, что оба подхода: рефлектометрия во временной и в частотной областях – активно развива-

ются в институтах Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) г. Пермь, причём, как с точки зрения использования этих методов, так и их разработки.

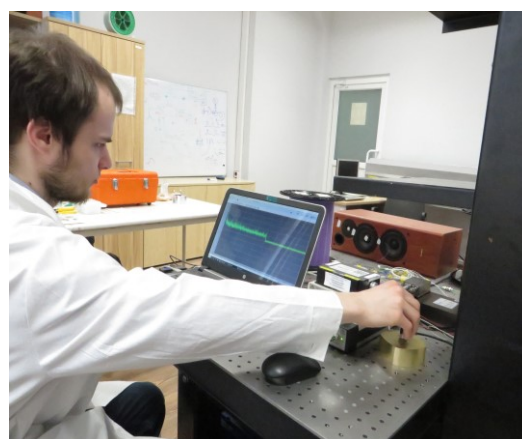
Первое, о чём логично было бы рассказать, это фазочувствительный рефлектометр во временной области, собранный совместной научной группой лаборатории фотоники Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) и лаборатории агробиофотоники Пермского научно-исследовательского института сельского хозяйства (ПНИИСХ), оба – филиалы ПФИЦ УрО РАН (рис. 3). Такое устройство позволяет «слышать» сенсор длиной в несколько километров, однако его будущее применение не отлов нарушителей на государственной гра-

нице, а наблюдение за насекомыми-вредителями. Сейчас научная группа делает всё возможное для увеличения чувствительности системы на дальней стороне линии и отношения сигнал/шум. За несколько лет команде удалось увеличить этот показатель более чем в 10 раз [13, 14].

Ещё одна разработка – это программно-аппаратный комплекс, позволяющий регистрировать во временной области температуры и деформации фрагментов оптического волокна от десятков до сотен километров. Эта работа ведётся всё той же лабораторией фотоники совместно с двумя малазийскими университетами – UKM (малаз. Universiti Kebangsaan Malaysia) и UNITEN (малаз. Universiti Tenaga Nasional) и Пермским национальным политехническим университетом (ПНИПУ) (рис. 4). Чтобы регистрировать и интерпретировать сверхслабое рас-



а



б

Рис. 3. (а) Распределенный акустический датчик, созданный в лаборатории фотоники ИМСС УрО РАН; (б) сотрудник лабораторий фотоники и агробиофотоники А.Т. Туров за работой



а



б

Рис. 4. (а) – Исследовательский стенд на базе рефлектометра-анализатора, созданный совместно ИМСС УрО РАН и ПНИПУ; (б) – совместное обсуждение результатов коллективами ИМСС УрО РАН и UKM (с российской стороны – сотрудники лаборатории фотоники Константинов Ю.А. и Кривошеев А.И.)

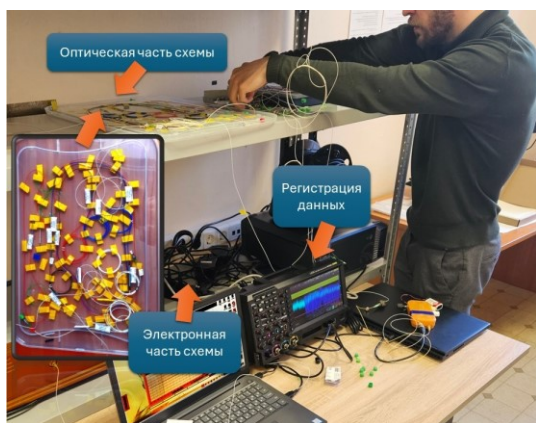
сеяние Мандельштама – Бриллюэна между-народная команда использует новейшие корреляционные и нейросетевые алгоритмы, которые позволяют детектировать сигнал даже тогда, когда, например, здание, где проложено сенсорное оптическое волокно, горит и начинает рушиться [15].

Наконец, в лаборатории фотоники созданная установка той самой оптической рефлектометрии частотной области (рис. 5). Первой задачей, которая была «поручена» первому пермскому OFDR, разумеется, стало исследование внутренней структуры интегрально-оптического чипа, поскольку такие устройства в Перми производят серийно, а значит, есть спрос на подобные исследования. С «боевым крещением» система справилась хорошо: исследователи смогли оценить геомет-

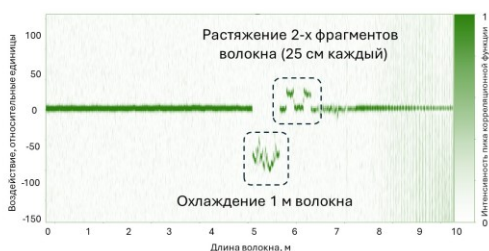
рию, топологию внутренних каналов, коэффициент затухания сигнала и, разумеется, интенсивности отражений в точках соединения такого типа с оптическим волокном. После этого команда начала «разведку» сенсорных возможностей своего устройства, что также было очень важно в контексте научного запроса других подразделений ИМСС УрО РАН, занимающихся задачами интерпретации данных с волоконно-оптических датчиков. Здесь рефлектометр-пермяк не подвёл: он успешно зарегистрировал поля температур и деформаций на десятиметровом сенсоре с разрешением несколько сотен микрон [16, 17]. Что ж, дальнейшее повышение пространственного разрешения и точности – первые задачи команды на ближайшие годы.

Чтобы не замыкаться на проектах этих научных групп, исследователи из ПФИЦ УрО РАН решили создать профильную научную конференцию – «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика» (ORMS), которая, пройдя в первый раз в 2016 году, на данный момент стала международной и собирает лучших исследователей в области распределённых измерений и сенсорики со всей страны, ближнего и дальнего зарубежья. Председателем конференции является Борис Георгиевич Горшков, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики РАН им. А.М. Прохорова.

Сейчас, работая с внушительным количеством авторитетных научных организаций в стране и за рубежом, пермская академическая фотоника не забывает и о том, что основная подпитка, фундамент, залог многолетнего успешного функционирования научной школы – это подготовленная и «заряженная» на научную работу местная молодёжь. Молодые сотрудники лаборатории фотоники уже не первый раз становятся руководителями школьных проектов «Академии первых», где ребята участвуют в настоящих исследованиях, связанных с оптической рефлектометрией. Чаще всего таким руководителем становится аспирант (в лаборатории фотоники – тради-



а



б

Рис. (а) Стенд оптической рефлектометрии частотной области и сотрудник лаборатории фотоники ИМСС УрО РАН, руководитель Малого инновационного предприятия «Лаборатория оптической рефлектометрии, метрологии и сенсорики» (МИП «ОРМС Лаб»), соучрежденное ПФИЦ УрО РАН, Белокрылов М.Е; (б) Визуализация воздействий на волоконный сенсор

ционно А.Т. Туров). Ведь иногда не так важно, каков у исследователя индекс Хирша и сколько статей первого квартиля он написал единолично – ценно то, сколько детских глаз он направил в небо, в ту неизвестную даль, в которой могут быть и глубины космоса, и рэлеевские центры оптического волокна – каждый выберет сам.

Библиографический список

1. Любимов М. Практические аспекты применения волоконно-оптических линий связи в системах телевизионного наблюдения [Электронный ресурс]. – URL: http://www.tzmagazine.ru/jpage_print.php?uid3=1150 (дата обращения 29.07.2024).
2. Сайт компании «Носір» [Электронный ресурс]. – URL: <https://nosir.ru/fizika/polnoe-vnutrennee-otrazhenie/> (дата обращения 29.07.2024).
3. Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Ponomarev, R.S. Metrological Applications of Optical Reflectometry: A Review // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. – 2022. – Vol. 11. – № 4. – P. 249–261. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.4.249-261>
4. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Yu.A., Lobach I.A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
5. Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T. [et al.] A Fiber Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer for Engineering Geology Application // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66. – P. 843–848 <https://doi.org/10.1134/S0020441223050020>.
6. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Sazonkin S.G., Pnev A.B., Bobrov A.N., Yagodnikov D.A. Non-Invasive Acoustic Monitoring of Gas Turbine Units by Fiber Optic Sensors // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 4781. <https://doi.org/10.3390/s22134781>.
7. Gritsenko T.V., Orlova M.V., Zhirnov A.A., Konstantinov Yu.A., Turov A.T., Barkov F.L., Khan R.I., Koshelev K.I., Svelto C., Pnev A.B. Detection and Recognition of Voice Commands by a Distributed Acoustic Sensor Based on Phase-Sensitive OTDR in the Smart Home Concept // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 2281. <https://doi.org/10.3390/s24072281>.
8. Orlova M.V., Gritsenko T.V., Zhirnov A.A. [et al.] Investigation of the Optimal Parameters of the Distributed Fiber Microphone Circuit Based on ϕ -OTDR for Speech Recognition // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66. – P. 832–836. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050202>.
9. Ashry I., Wang B., Mao Y., Sait M., Guo Y., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T., Ooi B.S. CNN-Aided Optical Fiber Distributed Acoustic Sensing for Early Detection of Red Palm Weevil: A Field Experiment // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 6491. <https://doi.org/10.3390/s22176491>.
10. Ashry I., Mao Y., Wang B., Sait M., Guo Y., Al-Shawaf A., Ng T.N., Ooi B.S. CNN-based detection of red palm weevil using optical-fiber-distributed acoustic sensing // Proc. SPIE 12008, Photonic Instrumentation Engineering IX, 120080U (5 March 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2609308>.
11. Eickhoff W., Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber // Applied Physics Letters. – 1981. – Vol. 39. – № 9. – P. 693–695. <https://doi.org/10.1063/1.92872>.
12. Fu C., Xiao S., Meng Y., Shan R., Liang W., Zhong H., Liao C., Yin X., Wang Y. OFDR shape sensor based on a femtosecond-laser-inscribed weak fiber Bragg grating array in a multicore fiber // Optics Letters. – 2024. – Vol. 49. – P. 1273–1276. <https://doi.org/10.1364/OL.516067>.
13. Turov A.T., Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Korobko D.A., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A. Activation Function Dynamic Averaging as a Technique for Nonlinear 2D Data Denoising in Distributed Acoustic Sensors // Algorithms. – 2023. – Vol. 16. – № 440. <https://doi.org/10.3390/a16090440>.
14. Turov A.T., Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A. Enhancing the Distributed Acoustic Sensors' (DAS) Performance by the Simple Noise Reduction Algorithms Sequential Application // Algorithms. – 2023. – Vol. 16. – № 217. <https://doi.org/10.3390/a16050217>.
15. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., A Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Yu.A. Improving Prediction Accuracy and Extraction Precision of Frequency Shift from Low-SNR Brillouin Gain Spectra in Distributed Structural Health Monitoring // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 2677. <https://doi.org/10.3390/s22072677>.
16. Belokrylov M.E., Kambur D.A., Konstantinov Yu.A., Claude D., Barkov F.L. An Optical Frequency Domain Reflectometer's (OFDR) Performance Improvement via Empirical Mode Decomposition (EMD) and Frequency Filtration for Smart Sensing // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 1253. <https://doi.org/10.3390/s24041253>.

17. Belokrylov M.E., Claude D., Konstantinov Yu.A. [et al.] Method for Increasing the Signal-to-Noise Ratio of Rayleigh Back-Scattered Radiation Registered by a Frequency Domain Optical Reflectometer Using Two-Stage Erbium Amplification // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66. – P. 761–768 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0020441223050172>.
18. Сайт серии конференций «ORMS» [Электронный ресурс]. – URL: <https://orms-conf.permsc.ru/> (дата обращения 29.07.2024).

AN EXCURSION ON THE REFLECTOGRAM

Konstantinov Yu.A.

Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS

For citation:

Konstantinov Yu.A. An Excursion on the Reflectogram // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 3. – P. 32–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.3.3>

In this paper, the basic principles of distributed measurements for the needs of metrology and sensorics, carried out with the help of methods of optical time domain reflectometry and optical frequency domain reflectometry, are presented in popular science form. The article introduces the reader to the work of the Photonics laboratory of the Institute of Continuous Media Mechanics, a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ICMM UB RAS).

Keywords: reflectometry, distributed measurements, fiber-optic sensors, photonics.

Сведения об авторе

Константинов Юрий Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru

Материал поступил в редакцию 05.08.2024 г.