КОГЕРЕНТНЫЙ РЭЛЕЕВСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР. ТЕПЕРЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

БУХАРИН М., ГОРБУЛЕНКО В., НАНИЙ О., НИКИТИН С., ТРЕЩИКОВ В., ФОМИРЯКОВ Э., ХАРАСОВ Д.,

«T8»

Подробную информацию об авторах см. на сайте www.fotonexpres.ru раздел «Наши авторы»

Рассмотрено развитие техники фазочувствительной оптической рефлектометрии для изменения температуры оптического волокна. В настоящее время такая технология используется в распределенной системе обнаружения акустических событий «Дунай», разработанной компанией «Т8 Сенсор» (входит в состав группы компаний «Т8»). Новая технология с зондированием волокна парными импульсами и с измерением оптической фазы отраженного сигнала позволили контролировать температуру на расстоянии до 75 км при пространственном разрешении 15 м и чувствительности 0.10 К. Созданный распределенный волоконный датчик способен одновременно отслеживать как изменения температуры, так и виброакустические возмущения вдоль одной и той же оптоволоконной линии.

Development of optical phase-sensitive technologies considered scatterometry were introduced for the temperature change of the optical fiber. At present, such technology is used in a distributed system detect acoustic events «DUNAJ» developed by T8 Sensor Ltd. New technology with fiber sensing and measurement of optical pulses in a pair of the phase of the reflected signal made it possible to control the temperature at distances up to 50 km with 15 m spatial resolution and sensitivity to 0.1°K. distributed fiber optic sensor is able to simultaneously track as temperature changes and vibroacoustic perturbations along the same optical line.

ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконно-оптические датчики, в которых оптическое волокно используется как чувствительный элемент – это очень эффективное решение для мониторинга протяженных объектов.

Ключевые слова: Когерентный рефлектометр, измерение температуры, DΔTS.

Keywords: Coherent OTDR, temperature measurement, D Δ TS.



Рис. 1. Схема обычного и когерентного рефлектометра

Распределённые акустические датчики на оптическом волокне получили широкое распространение благодаря созданию когерентного рефлектометра.

Принцип работы оптического рефлектометра заключается в следующем: зондирующий сигнал - короткий лазерный импульс направляется в оптическое волокно и регистрируется рассеянное и отраженное назад излучение (рис. 1.).

При распространении зондирующего сигнала по оптическому волокну часть света отражается обратно. Отражение происходит как от макроскопических дефектов волокна, так и за счет релеевского рассеяния. Регистрируя отраженный сигнал, можно построить график зависимости мощности отражённого сигнала от времени (расстояния до места рассеяния) – рефлектограмму.



Рис. 2а. Когерентная рефлектограмма

Вид этой рефлектограммы зависит от того, какой источник излучения используется: широкополосный или узкополосный (когерентный).

В когерентном рефлектометре (рис. 16) отражённые сигналы складываются когерентно: суммарный сигнал при этом зависит от разности фаз отраженных сигналов и может меняться от нуля (когда разность фаз π) до максимального значения (когда разность фаз нулевая). Разность фаз очень чувствительна к колебаниям длины участка, с которого собирается отраженные когерентные сигналы зондирующего сигнала (изменение длины 10-метрового участка оптоволокна всего на 2 нм (200 пикоСтрейн) вызывает заметное изменение мощности суммарного сигнала – длина то волны зондирующего сигнала порядка 1.5 мкм). На этом эффекте и основано применение когерентного рефлектометра для задач мониторинга протяженных объектов.

Когерентная рефлектограмма (Рис. 2а) представляет собой сильно изрезанную линию, форма которой очень чувствительна к различным воздействиям на волокно (тепловым, виброакустическим, механическому растяжению). При обработке рефлектограммы в обычном рефлектометре эффективно используется усреднение сигнала, в нашем случае разброс, нестабильность сигнала рефлектограммы в каждой точке является предметом анализа.

Для обнаружения воздействия на волокно, необходимо снять ряд последовательных рефлектограмм. Анализируя происходящие в них изменения, можно локализовать место воздействия, изучить спектр воздействующего сигнала, оценить частоту и интенсивность воздействия, его продолжительность и характер изменения во времени. На основе этих данных можно сделать предположения об источнике воздействия.



Рис. 26. Множество последовательных когерентных рефлектограмм при наличии воздействия на 50-м метре (численное моделирование).



Рис. 2в. Множество последовательных когерентных рефлектограмм при наличии воздействия (отображение результатов эксперимента на экране осциллографа).

Применение различных методов обработки сигнала и распознавания событий позволяет автоматически выделять и классифицировать происходящие воздействия, записывать происходящие события в базу данных, формировать сигналы тревоги для службы охраны или мониторинга протяженных объектов.

Основанный на этом методе программно-аппаратный комплекс «Дунай» (ПАК «Дунай») с 2012 по 2019 года успешно прошел многочисленные полевые испытания на оптоволоконных линиях ООО «Газпром» и ОАО «Ростелеком», полигонах Минобороны и Минатома, периметрах крупных аэропортов и аэропортов малой авиации (для мониторинга взлетно-посадочной полосы), объектах РЖД и протяженных объектах критической инфраструктуры в Южной Корее и Индии, которые подтвердили эффективность системы.

«В процессе тестовой эксплуатации продемонстрирована декларируемая чувствительность системы по всей длине кабеля...», «Все тесты пройдены успешно, с получением ожидаемого результата», «Результаты испытаний признаны успешными» – отмечается в отзывах от руководства дочерних предприятий ПАО «Газпром», подписанных с 2013 по 2018 года. Основное назначение системы «Дунай» – обнаружение несанкционированной активности (перемещение людей и техники, разработка грунта ручным или механизированным способом), локализация аварий и неисправностей, отслеживание работы подрядчиков. Одно из наиболее перспективных применений системы – контроль охранной зоны магистральных трубопроводов и точная локализация утечек. Система может также применяться для:

• мониторинга обстановки вдоль волоконно-оптических кабелей связи;

• охраны государственной границы и протяженных объектов критической инфраструктуры;

• мониторинга состояния автомобильных и железных дорог, а также: анализа аварийных ситуаций, средней скорости потока и интервального регулирования;

• мониторинга линий электропередач и силовых кабелей на предмет локализации короткого замыкания, удара молнии, локального перегрева, гололедообразования и повышенных вибраций вследствие ветра.

Система надёжно распознаёт более 10 типов событий, включая перемещение пешехода, ручную копку, проезд грузового автомобиля, работу тяжёлой техники, подкоп, утечки, короткое замыкание на линиях электропередач, а также позволяет с легкостью добавлять специфичные для заказчика новые классы событий благодаря распознаванию сигналов на основе дообучаемых нейронных сетей. Протяжённость зоны мониторинга, контролируемой одним рефлектометром, составляет до 75 км в стандартной конфигурации и до 100 км в расширенной конфигурации при использовании лишь одного оптического волокна без дополнительных усилителей на линейном участке (без удаленной накачки типа ROPA). Чувствительность системы к внешним воздействиям зависит от типа воздействия, физических характеристик кабеля (конструкции, глубины укладки), типа и состояния грунта. В среднем, перемещение и работа тяжёлой техники надёжно детектируется на расстоянии более 100 м от кабеля, движение грузового автомобиля – более 30-50 м, копка ручным инструментом – более 10 м, движение пешехода – более 5-8 м.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ На основе когерентного рэлеевского рефлектометра

Задача контроля температуры распределенным датчиком на основе оптического волокна является одной из наиболее актуальных. В настоящее время она решается при помощи рамановской и бриллюэновской рефлектометрии. Оба метода используют неупругое рассеяние фотонов, параметры этого процесса зависят от температуры, но дают обратно рассеянный сигнал малой интенсивности (до 2 порядков меньше рэлеевского), что является ограничивающим фактором при применении вследствие того, что для получения точного распределения температуры требуется длительное усреднение сигнала (от 1 до 10 минут), вследствие которого быстропротекающие процессы, такие как короткое замыкание или удар молнии с кратковременным разогревом кабеля, будут усреднены и пропущены.

Рэлеевское рассеяние представляет собой упругий процесс, характеризующийся заметно большей интенсивностью рассеяния и, таким образом, более подходит для создания распределенных датчиков, работающих на больших расстояниях.

В некогерентных оптических рефлектометрах (OTDR) рэлеевское рассеяние не зависит от внешних условий и для них нет простого решения задачи измерения температуры. В то же время, когерентный (фазочувствительный OTDR) очень чувствителен к внешним воздействиям, в том числе к температуре – надо это использовать.

Новый подход реализует принципы фазочувствительного OTDR для анализа как виброакустических событий, так и изменения температуры и натяжения оптического волокна. При этом достигаются следующие технические характеристики:

• температурная чувствительности 0.1 °К;

• быстродействие (время отклика на изменение температуры) 1 с;

• дальность работы системы до 75 км в стандартной конфигурации;

• пространственное разрешение 10-20 м при пространственной частоте дискретизации 1.5 м.

Созданный распределенный волоконный датчик способен одновременно отслеживать как изменения температуры, так и виброакустические возмущения вдоль одной и той же линии, что важно для приложений, связанных с мониторингом трубопроводов на предмет утечек нефти и газа, а также для мониторинга высоковольтных линий электропередач и силовых кабелей.

ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ

Рэлеевское рассеяние можно рассматривать как результат рассеяния на непрерывных очень слабых и случайных бреговских решетках. Оптическая разность фаз для двух отражений от локализованных решеток, разделенных геометрическим расстоянием *Lg*, изменяется с температурой. Для измерения температуры необходимо отслеживать изменение этой разности фаз. Для этого можно использовать Φ -OTDR с двух импульсной зондирующей последовательностью. В предложенной схеме измерения выполнялись при зондировании волокна последовательностью из четырех пар лазерных импульсов, при этом вторые в паре импульсы сдвинуты друг относительно друга по фазе на 0, $\pi/2$, π и $3\pi/2$, как показано на рис.3. В результате получают четыре интенсивности отраженного сигнала I1, I2, I3 и I4. Затем вычисляется оптическая разность фаз и относительное изменение температуры.

Пространственное разрешение метода определяется временем задержки между импульсами τ_d (300 нс)



Рис.3. Последовательность лазерных импульсов и задержка второго импульса относительно первого

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Для демонстрации DATS Рэлея на основе фазочувствительного рефлектометра с двухфазным фазомодулированным зондирующим сигналом использовалась экспериментальная установка, показанная на рис. 4. Циклическая последовательность, состоящая из четырех пар лазерных импульсов, необходимых для измерения фазы, была сформирована из излучения высоко когерентного лазера с использованием акустооптического модулятора (АОМ), который в дополнение к формированию импульсов также вносит циклический сдвиг фазы несущей для второго импульса в каждой паре. Лазер работал на фиксированной центральной длине волны 1550,3 нм с шириной линии ~ 1,5 кГц. Относительный уровень интенсивности шума лазера был ниже - 140 дБ / Гц на частотах выше 1 кГц. Импульсы, сформированные АОМом, усиливались эрбиевым волоконным усилителем и направлялись в волокно с частотой повторения 2 кГц.

Свет, обратно рассеянный на неоднородностях волокна, направлялся оптическим циркулятором на фотодетектор. Ток фотодиода прямо пропорционален интенсивности обратно рассеянного света I1, I2, I3 и I4,. Модуль обработки сигналов контролировал последовательность импульсов зондирования и использовался для предварительной обработки данных. Волокно зондировали с использованием пар импульсов 200 нс с относительной задержкой в 300 нс, соответствующих зондированию с пространственным разрешением 30 м.



DFB laser – лазер с распределенной обратной связью; AOM – акустооптический модулятор; Pulse Generator – импульсный генератор; Signal Processing – модуль обработки сигнала; EDFA – оптический эрбиевый усилитель; ADC – блок АЦП; PD – фотодетектор; Circ – циркулятор; FUT – участок волокна с меняющейся температурой; Oven – печь;

Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Тестовая линия была сформирована несколькими катушками одномодового волокна. Первая 19-километровая катушка «А» была размещена внутри теплоизолированного бокса, где поддерживалась постоянная температура. Следующий сегмент волокна «В» располагался внутри печи, что позволяло управлять изменением температуры. В первой конфигурации в печи, в общей сложности, находилось 180 метров волокна на двух отдельных катушках по 30 м и 150 м волокна. Катушка на 30 м была в дополнительном собственном пластиковом корпусе, а катушка на 150 м была непосредственно подвержена воздействию воздуха, циркулирующего внутри печи, что приводило к более быстрому изменению температуры. Во второй конфигурации в печь помещалась только одна катушка, содержащая 13 м волокна, без собственного корпуса. В обоих случаях температуру волокна измеряли термопарой. Линия заканчивалась 5-километровой волоконной катушкой «С», расположенной вне печи при температуре лаборатории, что приводит к общей длине линии 25 км.

Данные по временной зависимости интенсивности обратного рассеяния, измеренной Ф-OTDR, были сохранены на жестком диске компьютера и использовались для

ИЗМЕРЕНИЯ В ВОСП



Puc.5. Водопад изменения фазы сигнала вследствие изменения температуры

расчета распределения температуры вдоль тестируемого участка. Данные были получены со скоростью 2 кГц, поэтому фазу извлекали с эффективной скоростью 500 раз/с. При такой частоте дискретизации сигнал Ф-ОТDR содержит как акустический, так и тепловой вклад, они разделялись при помощи частотной фильтрации с использованием быстрого преобразования Фурье. Сигнал компонент со спектром выше определенной частоты (частоты среза) был приписан акустическому воздействию, а низкочастотный сигнал, включая компоненты с нулевой частотой, был отнесен к изменениям температуры. Как правило, частота среза представляет собой параметр, который должен быть оптимизирован для конкретного измерения и зависит от продолжительности измерения и интенсивности сопровождающего акустического шума. В экспериментах, описанных здесь, изменение температуры сопровождалось акустическим шумом высокой интенсивности, вызванным циркуляцией воздуха от вентилятора внутри печи. Было принято, что 1 Гц является адекватной величиной для частоты среза для данного эксперимента, что позднее было подтверждено сравнением полученного фазового сигнала с фактическим изменением температуры волокна, измеренным термопарой.

На рис. 5 (а) и (b) представлен экспериментально измеренный низкочастотный фазовый сигнал в виде диаграммы-«водопада», где интенсивность фазы показана с использованием цветовой карты и нанесена на график соответственно длине тестового волокна в метрах (по оси х) и времени записи в минутах (ось у). Представлены данные для участка волокна длиной 750 м, соответствующего катушке в печи. Геометрическое расстояние от рефлектометра до этого сегмента вдоль волоконной линии составляет около 19 км. Температура печи изменялась с +28 ° C до +50 ° C и обратно к комнатной температуре в течение нескольких часов. Во время работы печи комнатная температура не стабилизировалась и в течение периода экспериментов плавала на несколько градусов Цельсия.

Рис. 5 (а) соответствует нагреву и охлаждению двух катушек, содержащих 30 м и 150 м волокна. Продолжительность представленной записи составляет 3 часа 40 минут. Усредненный оптический фазовый сигнал при самой высокой температуре составляет 7,5 · 10⁴ радиан. Более короткая катушка (стоящая вначале) разогревается медленнее, чем вторая катушка - что объясняется лучшей теплоизоляцией более короткой катушки за счет ее корпуса. Рис.5 (b) соответствует нагреву и охлаждению катушки длиной 13 м. Продолжительность записи в этой конфигурации составляет 1 час 20 мин и для такого же увеличения температуры измеренная вариация оптической фазы составляет всего 3,2 · 10⁴ радиан. Это значение согласуется с более короткой длиной волокна 13 м, размещенной внутри печи, по сравнению с длиной 30 м. В обоих случаях наблюдается небольшое изменение комнатной температуры (z>500 м), на катушке «С», тогда как для волокна катушки «В» в термической коробке нет заметного температурного колебания (z<300 м). Небольшое превышение в конце фазы охлаждения по-видимому обусловлены остаточными неупругими деформациями.





Рис. 6. Сравнение данных DTS и прямых измерений температуры с помощью термопары

На рис.6 (а) и (b) представлено сравнение измерений термопар (обозначено «квадратными точками») с выбранными в соответствии с положением термопары одиночными каналами DTS (сплошные линии). Для эксперимента с катушкой длиной 30 м в собственном корпусе фазовый сигнал Ф-ОТРД и данные термопары сопоставимы друг с другомпри< ψ_d /L Δ T_c = 108,7 рад (м ° K) ⁻¹. Во втором случае, когда 13 м – фактическая длина размещенного в духовке волокна, наилучшее совпадение данных достигается при < ψ_d /L Δ T_c = 115,4 рад (м ° K) ⁻¹. Эти значения достаточно близки к друг другу, а также хорошо согласуются со значением 109,0 рад (м ° K) ⁻¹, рассчитанным для n=1,47, λ =1,55 мкм и γ =9,15•10⁻⁶(° K ⁻¹).

Небольшое несоответствие скорости изменения температуры может быть обусловлено различием в конструкциях катушек, влияющем на тепловое расширение волокна, а также незначительными различиями в самом материале волокон. Кроме того, некоторые отклонения температуры, измеренной термопарой, от данных DTS можно объяснить тем, что термопара была помещена на наружную поверхность катушки и ее показания не были скорректированы для температурного градиента внутри катушки, который влияет на измерение. Точность краткосрочного измерения температуры, определяемая путем вычисления стандартного отклонения показаний DTS в скользящем окне 10 с, составила ~10-1 К. Это значение согласуется с результатами численного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и экспериментально продемонстрирована новая методика измерения изменения температуры с помощью рэлеевского фазочувствительного рефлектометра. Представленный метод способен одновременно, с использованием одного и того же волокна, контролировать как изменения температуры, так и виброакустические возмущения. Экспериментальные данные находятся в согласии с теоретическими оценками. При кратковременном изменении температуры точность измерения находится на уровне 0.1°С при 20°С, с рабочей длиной линии до 75 км и пространственном разрешении 15 м и рекордным быстродействием на уровне 1 с для всей длины линии (до 75 км).

Представленный метод предлагает простую и надежную альтернативу методам, основанным на рамановском и бриллюэновском рассеянии, используемым в настоящее время для создания DTS на основе оптических волокон, особенно для приложений, требующих высокого разрешения по времени для анализа быстрпротекающих тепловых процессов (короткие замыкания, удар молнии, локальный кратковременный перегрев).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В.Горбуленко, А.В.Леонов, К. В.Марченко, В.Н.Трещиков, Волоконно-оптическая система мониторинга «Дунай» // Фотон-Экспресс 2014, №5,

2. S P Nikitin, A I Kuzmenkov, V V Gorbulenko, O E Nanii and V N Treshchikov, "Distributed temperature sensor based on a phase-sensitive optical time-domain Rayleigh reflectometer". Laser Physics v. 28, p. 085107 (2018)