

УДК 502/504:504.064:53.082.5

А. И. ВЯЛЫШЕВ, В. М. ДОБРОВ, А. А. ДОЛГОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий) (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ))

О. В. БУТОВ, А. Ю. ПЛЕШКОВ

Московский физико-технический институт (государственный университет)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА

Описаны новые подходы к измерению параметров окружающей среды и технических устройств в системах мониторинга, основанные на использовании возможностей оптоволоконных систем при различных методах обработки оптического сигнала. Показано, что использование таких систем позволит существенно упростить измерительный процесс, а также получить новые возможности измерения и анализа физических величин.

Волоконно-оптические датчики, световод, лазерное излучение, спектральный анализ.

In article new approaches to measurement of parameters of the environment and technical devices in the monitoring systems based on the use of possibilities of fiber-optical systems are described at various methods of an optical signal processing. It is shown that the use of such systems will allow to simplify essentially the measuring process and also to receive new possibilities of measurement and analysis of physical parameters.

Fiber-optical sensors, light guide, laser radiation, spectral analysis.

В сфере мониторинга и безопасности все большее распространение получают принципиально новые волоконно-оптические датчики, лишенные ряда существенных недостатков, присущих электрическим аналогам. Вместо электрических токов такие датчики для своей работы используют оптический сигнал. Как и в случае электрических аналогов, принципы преобразования, или генерации сигнала могут различаться, однако все типы волоконно-оптических датчиков обладают рядом неоспоримых преимуществ, среди которых можно выделить следующие [1]: нечувствительность к электромагнитным полям; взрыво- и пожаробезопасность за счет отсутствия электрических токов; возможность удаленного контроля без использования дополнительных устройств преобразования и усиления сигнала; малый размер; химическая инертность; как правило, высокая чувствительность и точность измерения.

Волоконный световод, который

является основой любого волоконно-оптического датчика, представляет собой кварцевую нить, структурированную по диаметру. В простейшем случае световод состоит из модифицированной кварцевой сердцевины с повышенным показателем преломления и светоотражающей оболочки из нелегированного кварцевого стекла. В зависимости от применения сердцевина может быть легирована различными элементами: германием, азотом, эрбием, оловом и т. п. Благодаря добавкам сам световод и датчики на его основе приобретают определенные производственные и эксплуатационные свойства: повышенную чувствительность к температуре, люминесцентные свойства, повышенную термическую стойкость и увеличенную фоточувствительность, технологически необходимую для создания ряда волоконно-оптических сенсорных элементов.

Все волоконно-оптические датчики можно условно разделить на два основных типа: распределенные и точечные.

Распределенные датчики используют свойства самого световода по всей его длине. Локализованное воздействие на любую часть чувствительного световода может быть зафиксировано по величине и местоположению. Именно такие датчики находят сейчас широкое применение для контроля протяженных трубопроводов.

Точечные датчики представляют собой структурно модифицированный или скомбинированный участок волоконного световода и позволяют производить контроль параметров в определенной точке или локальной области объекта (рис. 1а). Часто выделяют третий тип датчиков – квазираспределенные (рис. 1в). Такие датчики состоят из массива точечных сенсорных элементов, объединенных одним световодом и одним устройством преобразования. В рассматриваемой системе типичным представителем квазираспределенных датчиков могут быть датчики деформации, объединяемые последовательно в единую волоконную линию (рис. 1б).

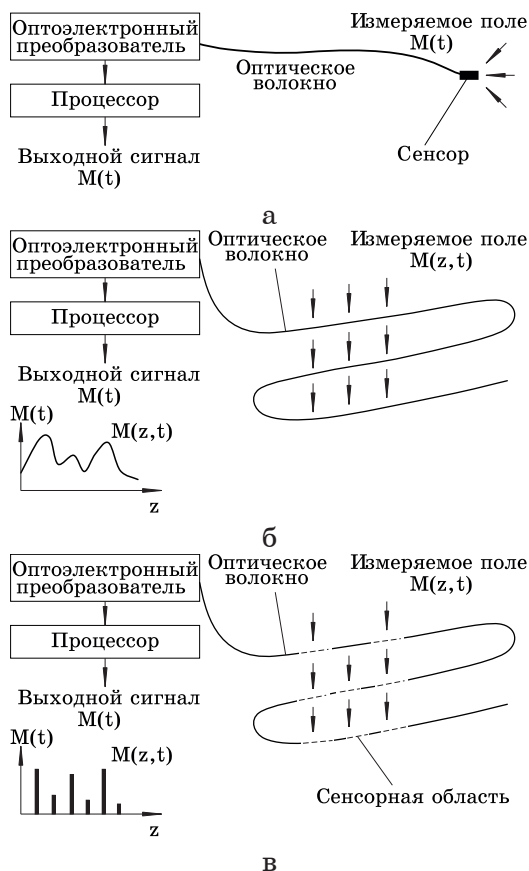


Рис. 1. Типы волоконно-оптических датчиков: а – точечные; б – распределенные; с – квазираспределенная система волоконно-оптических датчиков [2]

Подобные датчики, обладая всеми преимуществами точечных сенсоров, включая высокую точность измерения, позволяют осуществлять единовременный контроль в различных точках объекта или обеспечивать условно непрерывный мониторинг протяженных объектов.

По принципу действия волоконно-оптические датчики могут быть разделены на несколько основных типов: датчики на рассеянии, интерференционные, на основе внутриволоконных решеток.

Ниже приведены принципы действия различных волоконно-оптических датчиков и их применения для контроля объектов, в том числе подводных и надводных сооружений.

Датчики на рассеянии. Именно этот тип датчиков является синонимом термину «распределенные волоконные датчики». Принцип их действия основан на анализе сигнала обратного или прямого рассеяния в волокне. Во всех подобных системах используется короткий световой импульс, рассеяние которого фиксируется приемной аппаратурой. По времени прихода и величине принятого сигнала можно определить величину и место воздействия на опорное волокно. Точность определения величины воздействия на волокно и его местоположение зависит от длительности импульса и точности определения амплитуды сигнала. Для повышения точности используют многократное усреднение по многим измерениям, из-за чего время опроса может увеличиваться до нескольких минут. Как и в случае интерференционных датчиков, распределенные системы могут быть основаны на разных эффектах: релеевском и рамановском (комбинационном) рассеянии, рассеянии Мандельштама–Бриллюэна и т. п.

Наиболее простым вариантом датчика на рассеянии является система «релеевская рефлектометрия», основанная на анализе рассеяния на малых неоднородностях волокна. Подобные приборы используются в телекоммуникации для анализа параметров волоконной линии связи, а также для поиска мест обрыва волокна. Работая в качестве распределенного датчика, система откликается на температурные и механические воздействия на волоконный световод. Однако

точность подобных измерений невелика. Более интересными с точки зрения измерений являются системы на рамановском (комбинационном) и бриллюэновском рассеянии. В обоих случаях измеряется не рассеянный сигнал на длине волны излучения, а сдвинутые по частоте стоксовы и антистоксовы компоненты, зарождающиеся в первом случае на термических молекулярных колебаниях, а во втором случае – на звуковой волне (рис. 2).

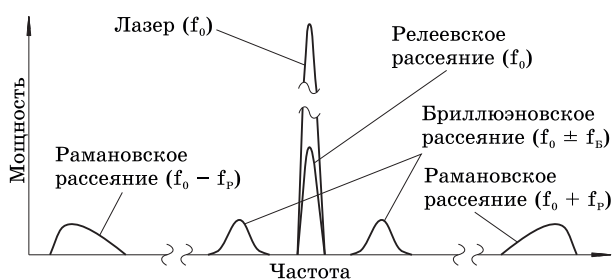


Рис. 2. Спектры рассеяния разных типов

Амплитуда антистоксового компонента рамановского излучения существенным образом зависит от температуры, тогда как стоксовый компонент практически не меняется. Именно по соотношению стоксового и антистоксового компонентов и определяется температурный эффект воздействия на участок волоконного световода. Механическое воздействие практически не влияет на рамановский эффект в световоде.

Наиболее перспективным методом является бриллюэновская рефлектометрия. В отличие от рамановской, соотношение сигналов стоксового и антистоксового компонентов не меняется с изменением температуры или при наличии деформации. Однако меняется частотный сдвиг этих компонентов. Любое воздействие (механическое или температурное) изменяет плотность вещества (а следовательно, скорость звука в нем), от которой и зависит величина сдвига бриллюэновской частоты. Примечательной особенностью и важным преимуществом бриллюэновских датчиков является независимость результатов измерений от амплитуды сигнала, поскольку измеряется именно частотный сдвиг, что существенно повышает надежность получаемых данных. И хотя сдвиг оптической

частоты относительно мал (гигагерцовый диапазон), использование специальной аппаратуры позволяет производить измерения высокой точности.

Сенсорные системы подобного типа могут использоваться для измерения температуры, механических деформаций. Например, точность современных систем измерения температуры такого типа достигает нескольких десятых градуса, а определения местоположения воздействия – менее метра. При этом общая длина датчика может достигать нескольких десятков километров. Именно эти свойства делают его незаменимым для непрерывного мониторинга протяженных трубопроводов. Любая утечка нефти или газа из трубопровода изменяет температуру окружающего материала трубопровода. Нагретая для транспортировки нефть дает повышение температуры в месте утечки. Современные алгоритмы анализа температурного распределения вдоль трубопровода позволяют однозначно идентифицировать утечку с высокой точностью. Помимо этого механические деформации трубопровода могут быть также идентифицированы. Аналогов таким системам контроля нет. Сейчас именно волоконно-оптические датчики на рассеянии активно внедряются в нефтяной и газовой промышленности для контроля целостности нефтегазопроводов.

Интерференционные волоконно-оптические. Оптоволоконные интерферометры – основа таких датчиков – базируются на известном эффекте интерференции света, когда два световых сигнала, взаимодействуя между собой, усиливают или гасят друг друга. Эффект зависит от фазы пришедшего оптического сигнала, которая варьирует с изменением пройденного расстояния световым пучком, а именно с изменением так называемого оптического пути.

Интерферометрические датчики основаны на анализе взаимодействия двух таких пучков, распространяющихся по одному или двум плечам интерферометра. Одно из «плеч» может являться эталонным с фиксированной пришедшей фазой светового пучка. Любое воздействие на второе приводит к изменению фазы второго пучка и, следовательно,

сигнала на выходе. Принцип построения волоконных интерферометров тот же, что и их «объемных» аналогов – схем, разработанных задолго до появления волоконного световода. Это могут быть схемы Фабри–Перо и Саньяка или двухплечевые интерферометры Маха–Цандера, Майкельсона и т. п. (рис. 3а). В качестве примера можно рассмотреть работу интерферометра Маха–Цандера, использующегося в современных оптических сейсмодатчиках (рис. 3б).

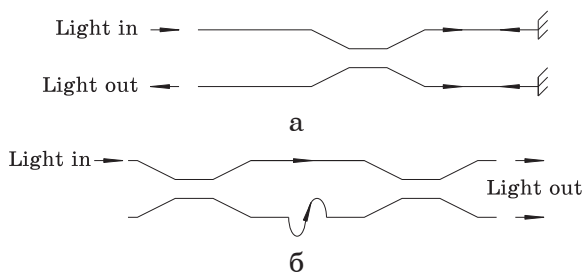


Рис. 3. Двухплечевой волоконный интерферометр: а – Майкельсона; б – Маха–Цандера

Свет от когерентного (лазерного) источника подается на вход интерферометра («Light in»), далее через оптический разветвитель поступает на два плеча интерферометра. Сигнал на выходе с помощью разветвителя суммируется и фиксируется фотоприемником («Light out»). При воздействии на одно из плеч интерферометра меняется оптический путь проходимого по нему светового сигнала, что влияет на фазу света при выходе. Изменение фазы фиксируется фотоприемником после взаимодействия световых пучков с разных плеч интерферометра.

Особенностью и одновременно существенным преимуществом таких датчиков является их чрезвычайно высокая чувствительность. Изменение фазы света может быть зафиксировано с высокой точностью, равной изменению оптического пути всего на 10^{-9} м. Именно высокая чувствительность интерферометров наряду с большим динамическим диапазоном делает их перспективными для применения в сейсмических донных станциях. В настоящее время в мире ведутся активные работы по разработке нового поколения оптических сейсмодатчиков, приходящих на смену устаревшим электрическим

аналогам, не удовлетворяющим по своим параметрам требования современной гео-разведки, непрерывного мониторинга гидро- и литосферы.

Датчики на основе внутриволоконных решеток. Датчики на решетках являются представителями точечных сенсоров, а будучи легко объединенными в массивы, образуют квазираспределенную систему. В основе датчика лежит так называемая брэгговская, или длиннопериодная решетка показателя преломления. Это, как правило, небольшой (3...20 мм) участок волоконного световода, в сердцевине которого сформирована периодическая структура, представляющая собой чередование областей с большим и меньшим показателями преломления вдоль волокна. Период решетки определяет ее тип и принцип действия.

Брэгговская решетка имеет период, по порядку величины сопоставимый с длиной волны опорного сигнала датчика. Такая решетка обладает уникальным свойством отражать свет в узком спектральном диапазоне с максимумом на длине волны λ_B , определяемым по закону Брэгга:

$$\lambda_B = 2\Lambda n,$$

где Λ – период решетки; n – усредненный показатель преломления световода для распространяющейся в нем моды.

Типичный спектр пропускания брэгговской решетки показан на рисунке 4. Изменение температуры окружающей среды приводит в основном к изменению показателя преломления материала световода. Это, в свою очередь, отражается на изменении длины волны отражения. Для анализа сигнала с брэгговского датчика используется портативный узкополосный спектрометр.

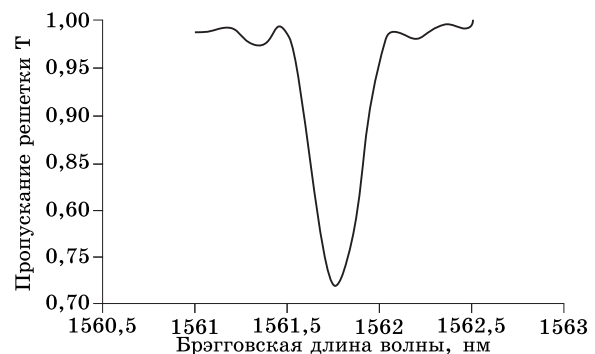


Рис. 4. Типичный спектр пропускания брэгговской решетки

Приложение к решетке механических воздействий также приводит к изменению ее периода. Именно этот эффект лежит в основе оптических тензодатчиков, широко используемых для контроля состояния сложных инженерных сооружений. Одновременный контроль температуры позволяет учитывать температурные деформации объекта, повышая точность измерения. Кроме того, брэгговский датчик при необходимости может быть оптимизирован для измерения давления и т. п. Брэгговские сенсоры, обладая всеми преимуществами волоконно-оптических датчиков, имеют чрезвычайно малый вес и размер – всего 0,12 мм в диаметре и 3...5 мм в длину, высокую чувствительность и малую инертность показаний. Они могут быть установлены в труднодоступных местах.

Однако, как упоминалось выше, самым примечательным свойством брэгговских датчиков является возможность их объединения в массивы с использованием одного подводящего световода и одного блока анализатора. Резонансная (брэгговская) длина волны является уникальным свойством датчика. Датчики с различными значениями этого параметра могут быть безболезненно объединены в последовательную цепь, получив на выходе многопиковый спектральный сигнал (рис. 5). Таким образом, одновременно с помощью всего одного одноканального прибора можно анализировать состояние до сотни датчиков. Это уникальное свойство брэгговских элементов дает существенное преимущество. Вместо использования тяжелых и негабаритных многожильных электрических кабелей достаточно протянуть всего один волоконный световод, соединяющий десятки датчиков с блоком анализатора.

Именно благодаря уникальным свойствам большое количество современных сенсорных систем мониторинга состояния конструкций основано именно на волоконно-оптических брэгговских датчиках – наиболее перспективных, надежных и удобных.

Отдельно следует сказать о новых возможностях в определении химического состава загрязнений, появившихся благодаря развитию рамановской спектроскопии.

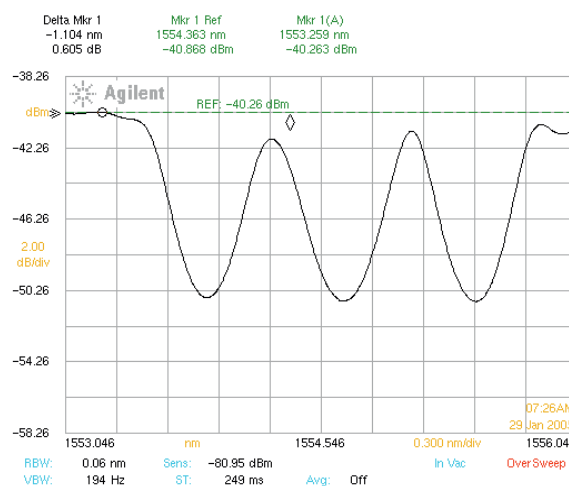


Рис. 5. Спектр пропускания трех брэгговских решеток, записанных на разные длины волн

Долгое время рамановская спектроскопия находилась на втором плане после инфракрасной спектроскопии ввиду сложности снятия спектра комбинационного рассеяния и его обработки. Появление лазеров, более доступных и чувствительных CCD-матриц, голографических фильтров, применение фурье-преобразования в приборах положили начало возрождению рамановской спектроскопии как основного средства бесконтактного неразрушающего анализа веществ.

Наиболее совершенные раман-спектрометры представляют собой единые модули с компьютерным управлением, с автоматической блокировкой лазера, с автоматическими процедурами калибровки и широким набором спектральных библиотек. Эти преимущества делают процедуру получения и использования рамановских спектров рутинным процессом.

В рамановской спектроскопии образец облучается монохроматическим светом (источником обычно является лазер). Как было отмечено, некоторое количество излучения, рассеянного образцом (примерно один фотон из миллиона, 0,0001 %), будет иметь частоту, смещенную по отношению к частоте исходного излучения лазера.

Спектры рамановского рассеяния (комбинационного рассеяния, или КР) чувствительны к природе химических связей – как в органических молекулах и полимерных материалах, так и в

неорганических кристаллических решетках и кластерах. По этой причине каждое вещество обладает своим собственным, индивидуальным рамановским спектром, как бы «спектральным отпечатком пальца».

Основными преимуществами метода КР перед традиционными методами химического анализа являются следующие:

метод КР обеспечивает проведение контроля бесконтактным неразрушающим методом, т. е. для осуществления измерения исследуемый образец не повреждается;

не требуется специальная подготовка образца;

возможен анализ твердых материалов и жидкостей, в отдельных случаях – газов;

благодаря внедрению современных методов обработки спектральных данных процесс анализа проходит практически мгновенно – от сотых и тысячных долей секунды;

возможность удаленного бесконтактного анализа путем выносного модуля с использованием оптического волокна;

возможность работы с водными растворами;

возможность сканирования по глубине образца, прозрачного в выбранном диапазоне.

Поскольку рамановская спектроскопия обеспечивает проведение бесконтактных и удаленных измерений и при этом полностью совместима с анализом водных образцов, данный метод оптимален для контроля следующих составов: растворов и реакционных смесей; эмульсий; паст и суспензий; парогазовых смесей в реакторах и над твердыми веществами; сливных жидкостей; жидких отходов.

С учетом высокой чувствительности метода, узости линий в спектре и отсутствия требования разрушения исследуемого образца метод комбинационного рассеяния является подходящим для построения систем идентификации веществ на его основе.

Выводы

Используя производственные и эксплуатационные преимущества волоконно-оптических сенсорных элементов, можно создать непрерывный

комплексный мониторинг природно-технических систем, отличающийся большой оперативностью, информативностью и достоверностью выдаваемых параметров состояния таких систем, что, в свою очередь, обеспечивает принятие оптимальных управленческих решений для предупреждения чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера [3].

1. Стерлинг Д. Волоконная оптика. – 2-е изд. – Изд-во «Лори», 2001. – 304 с.

2. Горшков Б. Г., Парамонов В. М., Курков А. С., Кулаков А. Т., Заирный М. В. Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра // Квантовая электроника. – 2006. – № 36. – 963 с.

3. Вялышев А. И., Добров В. М., Долгов А. А., Плешков А. Ю., Цомаева Д. С. Система комплексного экологического мониторинга при эксплуатации объектов морской нефтегазодобычи: Роль мелиорации и водного хозяйства в инновационном развитии АПК. Ч. III. Экология окружающей среды: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: ФГБУ ВПО МГУП, 2012. – С. 16–26.

Материал поступил в редакцию 15.04.13.

Вялышев Александр Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

E-mail: vialyshev@rambler.ru

Добров Владимир Михайлович, старший научный сотрудник

E-mail: dobrov007@mail.ru

Долгов Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

E-mail: dolaa@rambler.ru

Плешков Антон Юрьевич, кандидат педагогических наук, зам. заведующего кафедрой

8 (496) 408-49-36

Бутов Олег Викторович, старший научный сотрудник