

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О.В. Бутов, И.М. Мухаметжанов (ООО "Бизнес-Юнитек")

Неотъемлемой частью любой автоматизированной системы является обратная связь между ее исполнительными и контролирующими элементами, которая обеспечивается, в первую очередь, датчиками различного назначения. В статье рассматривается новое поколение высокоэффективных и практичных сенсорных систем - волоконно-оптические датчики. Дан краткий обзор существующих типов волоконно-оптических датчиков, рассмотрены особенности и преимущества таких датчиков над электрическими аналогами, указаны области их применения.

Важнейшим элементом практически всех автоматизированных систем являются датчики различного назначения. Это могут быть химические датчики, фотосенсоры различных конструкций, датчики температуры, давления, деформации, перемещения, электромагнитных полей и других физических величин. Будучи составной частью системы управления, именно датчики обеспечивают необходимую обратную связь в автоматических процессах на производстве.

Показания датчиков помогают не только автоматизировать различные производственные процессы, но и осуществлять бесперебойный контроль важных параметров в процессе эксплуатации устройств и конструкций, что обеспечивает их длительную бесперебойную службу и позволяет предупредить возможные поломки и разрушения. Автоматический контроль объекта позволяет не только избежать дорогостоящего ремонта, но и значительно уменьшить эксплуатационные расходы за счет уменьшения ручного контроля и проверки объекта.

В настоящее время в современном производстве используются датчики, основанные на преобразовании или генерации электрических сигналов. Наиболее типичным примером таких датчиков могут быть термосопротивления и термопары, электрические тензодатчики, полупроводниковые фотоэлементы, микрофоны, расходомеры и т.п. Принцип работы таких датчиков может сильно различаться, но на выходе в любом случае получается сгенерированный или преобразованный электрический сигнал. Однако в ряде случаев использование электрических датчиков за-

труднительно или нежелательно по технологическим соображениям. Кроме того, работа с малыми токами становится затруднительной на больших расстояниях, в условиях сильных электромагнитных помех. Как правило, каждый электрический датчик требует индивидуальной проводки и отдельного канала в аппаратуре преобразователя.

Все большее распространение получают принципиально новые, волоконно-оптические датчики, лишенные перечисленных недостатков [1, 2]. Вместо электрических токов такие датчики используют для своей работы 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:

- 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;
- высокая чувствительность и точность измерения.

Волоконный световод, который лежит в основе 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 такими, как германий, азот, эрбий, олово и т.п. Благодаря таким добавкам световод и датчики на его основе приобретают определенные производственные и эксплуатационные свойства: повышенная чувствительность к температуре, люминесцентные свойства, повышенная термическая стойкость и увеличенная фоточувствительность к ультрафиолетовому облучению, необходимая для ряда технологий записи 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 (рис. 1б). Локализованное воздействие на любую часть чувствительного световода может быть зафиксировано по величине и местоположению.

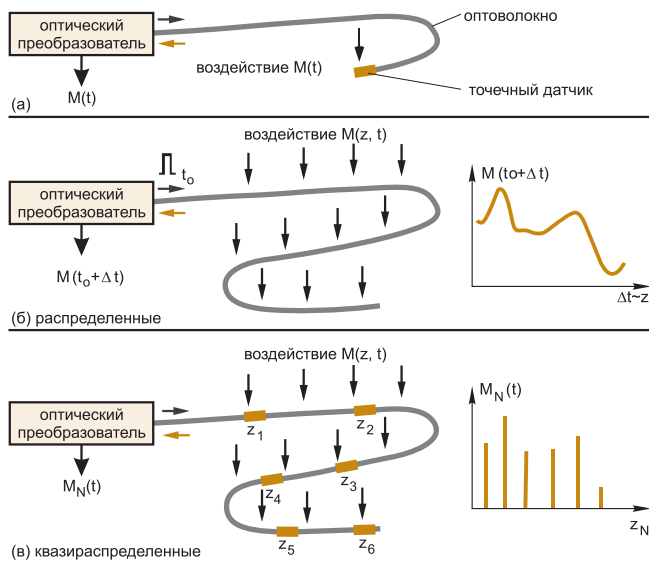


Рис. 1. Типы волоконно-оптических датчиков

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. Такие датчики состоят из массива точечных сенсорных элементов, последовательно объединенных одним волоконным световодом и снабженных единым устройством преобразования (рис. 1в).

По принципу действия волоконно-оптические датчики могут быть разделены на пять основных типов: интерференционные, датчики на рассеянии, люминесцентные, на основе внутриволоконных решеток, комбинированные. Рассмотрим каждый тип подробнее.

Интерференционные датчики

Как следует из названия, такие датчики используют в своей основе волоконные интерферометры. Интерферометрические датчики основаны на анализе взаимодействия двух сигналов, распространяющихся по одному или двум "плечам" интерферометра. Одно из "плеч" может являться эталонным. Любое воздействие на второе приводит к изменению сигнала на выходе. Принцип построения волоконных интерферометров схож с их "объемными" аналогами – схемами, разработанными задолго до появления волоконного световода. Это могут быть схемы Фабри-Перо и Саньяка, или двуплечевые интерферометры Маха-Цандера, Майкельсона и т.п. (рис. 2).

Важной особенностью и одновременно существенным преимуществом таких датчиков является их чрезвычайно высокая чувствительность. Так, датчики температуры могут чувствовать изменения всего в тысячные градуса. Волоконные интерферометры могут быть использованы, например, для контроля концентрации химических растворов, в качестве газоанализаторов или для измерения сверхмалых перемещений и угловых скоростей. Уже в настоящее время работают чувствительные вибрационные и акустические датчики, датчики смещения, детекторы движения. Все большее распространение получают волоконные гироскопы, используемые в точных навигационных приборах и системах автоматического пилотирования. Высокочувствительные датчики давления, основанные на интерферометре Фабри-Перо, также уже успешно применяются в современной промышленности (рис. 3).

Датчики на рассеянии

Именно этот тип датчиков фактически является синонимом термину "распределенные волоконные датчики". Принцип их действия основан на анализе сигнала обратного или прямого рассеяния света в оптоволокне. По времени прихода и величине принятого сигнала можно определить величину и место воздействия на оптоволокно (рис. 4). Как и в случае интерференционных датчиков, распределенные системы могут быть основаны на разных эффектах – Рэлеевское и Рамановское (комбинационное) рассеяние, рассеяние Манделъштама-Бриллю-

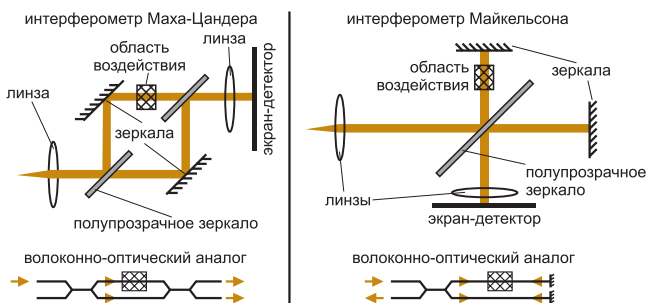


Рис. 2. Принципы действия волоконных интерферометров

ена и т.п. Во всех датчиках этого типа измеряемым параметром является интенсивность рассеянного света.

Сенсорные системы подобного типа могут использоваться для измерения температуры, механических деформаций и даже в качестве сейсмодатчиков. Типичным представителем такого типа датчиков является распределенный датчик температуры. Точность современных систем такого типа достигает нескольких десятых градуса, а определения местоположения воздействия – менее метра. При этом общая длина датчика может достигать нескольких километров. Распределенные датчики незаменимы для контроля больших площадей, могут быть использованы в охранных системах на больших периметрах, в качестве датчиков сейсмического контроля, для мониторинга состояния больших сооружений, промышленных резервуаров. Для атомной промышленности весьма интересны будут распределенные датчики радиации и счетчики фотонов, которые позволяют контролировать не только локальные объекты атомной промышленности, но и большие территории, находящиеся в потенциально опасной зоне. В частности, с высокой пространственной точностью может быть определено местоположение точечного источника радиоактивного излучения.

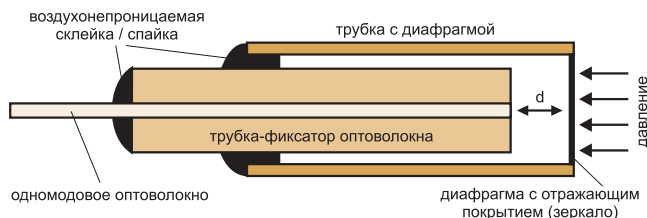


Рис. 3. Датчик давления на волоконном интерферометре Фабри-Перо

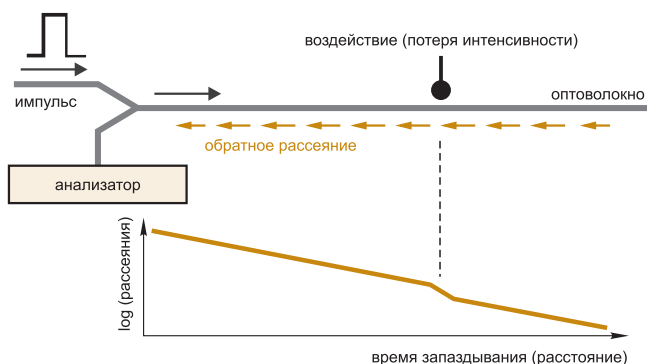


Рис. 4. Распределенный волоконно-оптический датчик

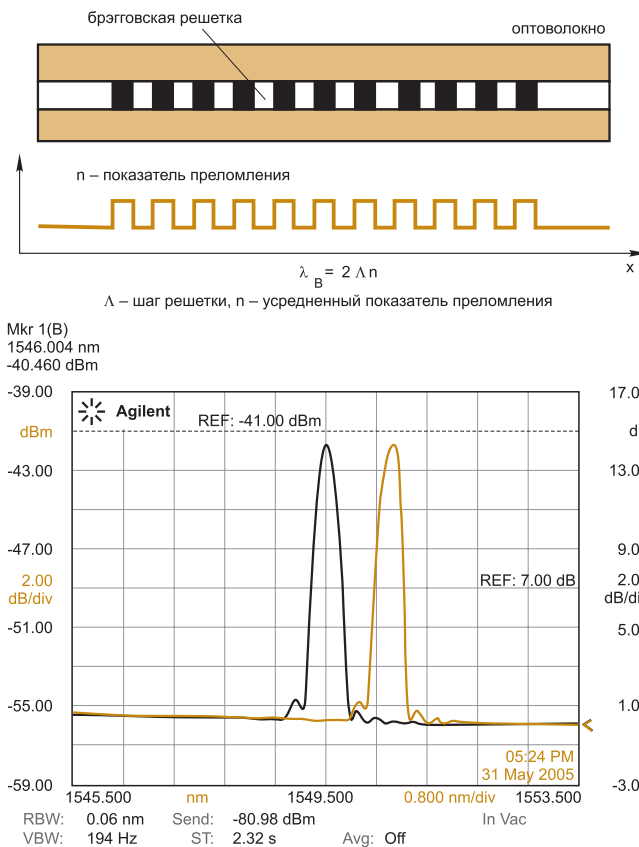


Рис. 5. Брегговский волоконный датчик (сверху) и смещение спектра отражения с изменением температуры (снизу)

Люминесцентные датчики

Люминесцентные датчики относятся к типу точечных сенсоров. Это менее распространенный тип волоконно-оптических датчиков, занимающих, однако, определенную нишу в современной промышленности. Действие таких датчиков основано на изменении люминесцентных свойств материала световода под действием температуры. Для создания эффекта люминесценции сердцевину световода обычно легируют редкоземельными элементами. Основным преимуществом таких датчиков является их уникально высокий температурный предел использования — до 1250°C.

Датчики на основе внутриволоконных решеток

Датчики на решетках являются представителями точечных сенсоров и, будучи объединенными в массивы, легко образуют квазираспределенную систему. В основе датчика лежит так называемая брегговская 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 показателем преломления вдоль волокна. Период решетки определяет ее тип и принцип действия. Брегговская решетка имеет период, по порядку величины сопоставимый с длиной волны света 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, а n — усредненный показатель преломления (рис. 5). Изменение температуры окружающей среды приводит в основном к изменению показателя преломления материала световода. Это, в свою очередь, отражается на изменении длины волны отражения (рис. 5). Для анализа сигнала с брегговского датчика используется портативный узкополосный спектрометр. В отличие от других типов, измеряемым параметром в датчиках на внутриволоконных решетках является уход резонансной частоты чувствительного элемента, что является важной особенностью, так как делает датчики этого типа мало чувствительными к изменениям амплитуды зондирующего светового сигнала.

Датчики температуры на основе брегговских решеток показывают высокую разрешающую способность — до 0,05°C. Однако до недавнего времени их широкое использование существенно ограничивалось верхним температурным порогом — 85°C, отдельные экземпляры — 150°C.

Решить проблему удалось благодаря инновационной разработке компании "Бизнес-Юнитек", позволяющей поднять температурный порог датчиков до 500°C с возможностью кратковременных нагревов вплоть до 900°C. Этого удалось достичь за счет использования при изготовлении внутриволоконных решеток волоконного световода нового типа [3].

Приложение к решетке механических воздействий также приводит к изменению ее периода. Этот эффект лежит в основе оптических тензодатчиков, широко используемых для контроля состояния сложных инженерных сооружений: от мостов и перекрытий до стенок атомных реакторов. Брегговский датчик может быть оптимизирован для измерения давления, механических деформаций, магнитных полей и т.п.

Все большее распространение в различных областях промышленности брегговские датчики получают за счет своих уникальных свойств. Обладая всеми преимуществами волоконно-оптических датчиков, они имеют чрезвычайно малый вес и размер — всего 0,12 мм в диаметре и 3...5 мм в длину, высокую чувствительность и малую инертность показаний. Брегговские датчики могут быть установлены в труднодоступных местах.

Однако самым примечательным свойством брегговских датчиков является возможность их последовательного объединения в массивы с использованием всего одного подводящего световода и одного блока анализатора. Резонансная (брегговская) длина волны является уникальной характеристикой каждого такого датчика. Путем создания датчиков с различными зна-

чениями этого параметра оказывается возможной их дискриминация в объединенной последовательной цепи, спектральный отклик которой представляет собой многопиковый сигнал (рис. 6). Таким образом, одновременно с помощью всего одного одноканального спектрального прибора возможно анализировать состояние до сотни датчиков. Это уникальное свойство брэгговских элементов дает существенное преимущество особенно в таких областях, как авиация и космос, нефтяная и газовая промышленность. Вместо использования тяжелых и негабаритных многожильных электрических кабелей достаточно протянуть всего один волоконный световод, соединяющий десятки датчиков с блоком анализатора спектра.

Диапазон областей использования брэгговских датчиков весьма широк. Это механический и температурный контроль состояния производственных агрегатов и котлов, различных инженерных сооружений, мощных энергетических установок, контроль сложных ТП, мониторинг состояния корпусов кораблей и летательных аппаратов, автоматический мониторинг нефтехранилищ и нефтяных скважин, контроль процессов при обработке призабойных зон и буровых установок – вот далеко не полный перечень использования брэгговских датчиков физических величин. И существенную роль в расширении областей их практического применения сыграла возможность значительно повышения верхнего предела рабочих температур, которая появилась благодаря использованию высокотемпературных брэгговских сенсорных элементов компании "Бизнес-Юнитек".

Менее распространены датчики на основе так называемых длиннопериодных решеток. Как видно из названия, период такой структуры много больше длины волны. Такая решетка не отражает сигнал, но как интерференционный фильтр изменяет спектр пропускания. Чувствительность спектра пропускания к температуре может быть различной, в зависимости от структуры световода. Чаще такие решетки используются в комбинированных датчиках.

Комбинированные датчики

Комбинированные волоконно-оптические датчики создаются на основе рассмотренных выше типах датчиков. Объединяя свойства различных сенсорных элементов, удастся значительно поднять их эксплуатационные характеристики. Например, объединением двух брэгговских и длиннопериодной решеток удастся создать высокочувствительный датчик деформации, совмещенный одновременно с датчиком температуры. Использование волоконных лазеров в качестве датчиков возможно благодаря объединению брэгговской решетки и люминесцент-

Бутов Олег Владиславович — канд. физ.-мат. наук, руководитель научно-технического отдела,

Мухаметжанов Ильдар Максutowич — канд. физ.-мат. наук, руководитель производственного отдела ООО "Бизнес-Юнитек".

*Контактный телефон: (495) 132-83-10.
http://www.b-tech.ru E-mail: info@b-tech.ru*

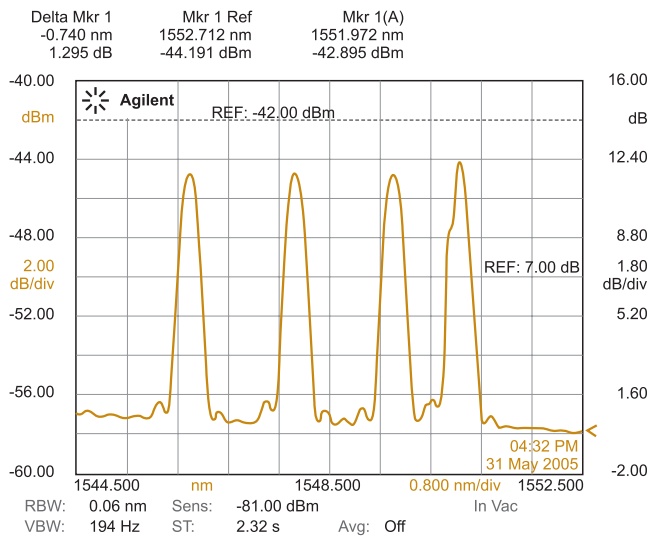
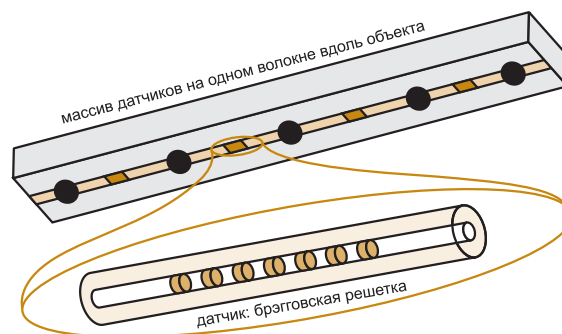


Рис. 6. Массив брэгговских датчиков (сверху) и его типичный спектр отражения (снизу)

ного датчика. Возможно повышение эффективности использования волоконных интерферометров с брэгговскими зеркалами. Весьма удачным с точки зрения эксплуатационных характеристик может оказаться брэгговский датчик с интерференционным анализатором.

Заключение

Таким образом, благодаря своим уникальным характеристикам волоконно-оптические датчики все активнее занимают свое достойное место в современной промышленности, уверенно вытесняя электрические аналоги.

Список литературы

1. "Optical Fiber Sensor Technology, fundamentals", edited by K.T.V. Grattan and B.T. Meggitt, Kluwer Academic Publishers, 2000.
2. "Handbook of Optical Fiber Sensing Technology", edited by Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
3. O.V. Butov, E.M. Dianov, K.M. Golant, "Nitrogen-doped silica-core fibers for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures", Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 975-979.