

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В.А.Кузнецов, В.Н.Цуканов, М.Я.Яковлев

Рассмотрены волоконно-оптические информационно-измерительные системы. Указаны области их применения и принцип действия. Приведено устройство сопряжения контрольно-измерительной аппаратуры и персонального компьютера. Даны перспективные методы цифровой обработки сигналов от волоконно-оптических измерительных систем.

Fiber-optic information-measuring systems. V.A.Kuznetsov, V.N.Tsukanov, M.Ya.Yakovlev. Fiber-optic information-measuring systems are considered. Application fields of fiber-optic measuring systems and a principle of their operation are specified. The interface unit of the controlling equipment and a PC is considered. Perspective methods of digital signal processing from fiber-optic measuring systems are given.

1. ВВЕДЕНИЕ

Часто возникает задача непрерывного мониторинга состояния таких объектов, как конструкции самолетов, плотины, мосты, дамбы, получать температурный профиль вдоль всей скважины бурения в течении продолжительного времени и многих других, где необходимо контролировать прочность конструкции и вероятность возникновения аварии. Малые масса и размеры оптического волокна; его пожаробезопасность; высокая коррозионная стойкость, особенно к химическим растворителям, маслам, воде; невысокая стоимость; взрывобезопасность; безиндукционность, а также многие другие достоинства оптических волокон открывают широкие перспективы для использования их в качестве чувствительных элементов в информационно-измерительных системах сбора данных для измерения распределения физических величин в пространстве.

Волоконно-оптический датчик (ВОД) – это средство измерений, состоящее из измерительного преобразователя (ИП), преобразующего измеряемую физическую величину в какой-либо параметр оптического сигнала, передаваемого по оптическому волокну, соединенного волоконно-оптической линией связи с устройством преобразования и обработки оптических сигналов, обеспечивающих метрологические свойства датчика и выработку сигналов измерительной информации в удобном виде.

Волоконно-оптическая система сбора данных (ВОССД) – это совокупность аппаратно-программных средств и волоконно-оптических средств передачи (ВОСП), обеспечивающих сбор измерительной информации от множества ВОД и её передачу оператору в соответствии с заложенным алгоритмом.



Рис. 1. Функциональная структурная схема построения ВОССД.

Измерительная подсистема преобразует измеряемые значения физических величин в оптические сигналы, передаваемые по оптическому волокну в коммуникационную подсистему.

Коммуникационная подсистема обеспечивает сбор и передачу оптических сигналов первичной измерительной информации от объединяемой совокупности ИП ВОД к средствам их первичной обработки, а также, при необходимости, передачи и распределения между ИП ВОД зондирующих оптических сигналов и сигналов их возбуждения.

Подсистема первичной обработки и формирования данных обеспечивает управление сбором оптических сигналов первичной измерительной информации от измерительной подсистемы, управляет формированием и распределением зондирующих оптических сигналов и сигналов возбуждения ИП ВОД, преобразование и первичную обработку сигналов измерительной информации, а также формирование блоков данных.

Коммуникационная подсистема 2 – это волоконно-оптическое средство передачи, обеспечивающее обмен оптическими сигналами цифровой информации между блоками указанных выше подсистем.

Информационно-вычислительная подсистема обеспечивает обработку и корректировку полученной измерительной информации, диагностику состояния ВОССД, а также, при необходимости, корректировку алгоритмов

функционирования ВОССД и визуализацию результатов измерения.

В ВОССД могут объединяться ВОД и ИП: спектрального, амплитудного, частотного, фазового и поляризационного типов. С помощью этих систем можно измерить значения: силы и давления, деформаций, линейного и углового перемещения, линейного ускорения, скорости вращения, скорости потока и расхода жидкостей, уровней акустических, гидроакустических и сейсмических сигналов, уровня изменения напряженности магнитного поля, силу электрического тока, напряжение, фиксацию касания, дозу радиационного излучения, температуру и многое другое.

Распределенные волоконно-оптических датчики (РВОД) уже широко применяются за рубежом для задач мониторинга распределенных в пространстве параметров объекта. Когда необходима точная и надежная информация об объекте с целью принятия управляющего решения – РВОД представляются оптимальным средством для этого.

Волоконно-оптические датчики могут быть как активными, которые под воздействием на них измеряемой величины сами генерируют излучение, которое по оптическому волокну канализуется к фотоприемникам, так и пассивными, которые под воздействием измеряемой величины осуществляют модуляцию проходящего через них потока оптического излучения, генерируемого сторонними источниками излучения.

Поток оптического излучения, проходящего через оптическое волокно, можно описать с помощью нескольких параметров, каждый из которых можно промодулировать независимо от других. Модуляция любого из этих параметров должна быть преобразована без потерь информации об измеряемой величине в модуляцию интенсивности, что обусловлено тем, что в выходном электрическом сигнале фотоприемника (токе) остается только один параметр – сила фототока, которая адекватно отображает только один параметр оптического потока, поступающего на вход фотоприемника. Модулируются обычно такие параметры как интенсивность оптического потока, частота световых колебаний, фаза световой волны и угол поворота плоскости колебаний электрического (магнитного) вектора световой волны. Последние три необходимо модулировать непосредственно перед подачей их сигналов на фотоприемник.[1]

Существуют ВОД, в которых в оптическое волокно включается ряд дискретных точечных чувствительных элементов (ЧЭ) и под действием внешнего воздействия в которых возникает модуляция. ЧЭ в таких ВОД могут служить,

например, брэгговские внутриволоконные дифракционные решетки. Однако наибольший практический интерес вызывают ВОД, построенные на базе таких оптических эффектов, как рамановское рассеяние и рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. По существу эти измерительные преобразователи (ИП) делятся на два типа: на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ИП температуры) и на основе эффекта Мандельштама-Бриллюэна (ИП температуры и деформаций).

Анализируя рынок ВОД можно сделать вывод, что за последние годы он постоянно растет. В мире было произведено ВОД и их компонентов на десятки миллиардов долларов. Все большее количество фирм разработчиков ВОЛС переключается на производство и разработку ВОД. [2]

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОД И ИХ ОСНОВНЫЕ ТИПЫ

Наибольшую потребность в ВОД испытывает военная отрасль с её повышенными требованиями к надежности и способностью аппаратуры работать в неблагоприятных условиях, но важно и промышленное применение в металлургической, химической, нефтегазодобывающей отрасли, в топливно-энергетическом комплексе, автомобильной промышленности и многих других.

Преимущество использования ВОД состоит в том, что обеспечивается:

- отсутствие влияния на измерительную аппаратуру, а следовательно и результат измерений, электромагнитных полей и побочных излучений;
- отсутствие проблем с заземлением;
- отсутствие проблем с дугообразованием и искрением;
- высокая стойкость к неблагоприятным воздействиям окружающей среды;
- возможность измерений во взрывоопасной среде;
- отсутствие химических реакций волокна с измеряемой средой;
- высокая механическая прочность и простота конструкции;
- стойкость к повышенным температурам;

И самое главное, ВОД позволяют проводить дистанционные измерения в ситуациях, когда электронные датчики использовать либо невозможно, либо нежелательно. В сложившейся ситуации 'строительного бума' в Москве – ВОД представляют собой достаточно перспективные и привлекательные инструменты для создания систем мониторинга различных строительных конструкций на базе волоконно-оптических

измерительных систем. Применение традиционных датчиков для контроля протяженных объектов создает множество проблем, связанных с огромным количеством дискретных датчиков, их размещением с целью снизить взаимные помехи. Для РВОД таких проблем нет.

Все ВОД можно условно разделить на три типа: точечные, распределенные и квазираспределенные.[3] Точечные позволяют контролировать с высокой точностью такие локальные параметры объекта как температура, давление, скорость вращения и т.д.. РВОД непрерывно контролируют параметры больших протяженных объектов с заданной разрешающей пространственной способностью. Квазираспределенные ВОД объединяют преимущества первых двух типов датчиков. Они представляют собой массив точечных сенсорных элементов, объединенных общим оптическим волокном. Каждый элемент обладает уникальными характеристиками, что позволяет провести их независимый анализ.

Из точечных ВОД возможно создание квазираспределенных ВОД. В оптическое волокно встраивается ряд дискретных точечных чувствительных элементов (ЧЭ), в которых под действием внешних воздействий происходит модуляция интенсивности, фазы или спектра излучения. На рис.2 представлены две основные схемы построения точечных ВОД, которые могут использоваться, например, для измерения температуры или давления: отражательного (рис.2а) и проходного типа (рис. 2б). [3]

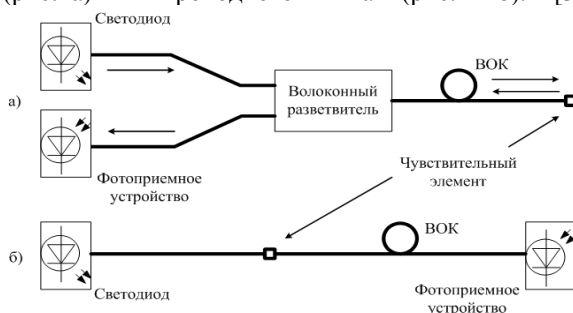


Рис.2. Схема ВОД отражательного (а) и проходного (б) типа с чувствительными элементами

Для расчета ЧЭ необходимо учитывать:

- диаметр волокна,
- числовую апертуру,
- коэффициенты пропускания или отражения чувствительных элементов и возникающие при этом потери света на границах раздела волокно-ЧЭ-волокно или волокно-ЧЭ (границы ЧЭ могут служить зеркалом. В качестве зеркала может также использоваться граница раздела ЧЭ-воздух или ЧЭ-вакуум),

- условия согласования источника оптического излучения, фотоприемного устройства с волокном.

Для измерений важна структура именно чувствительного элемента, от того, как он спроектирован и изготовлен будет изменяться и измеряемая величина. Одним из видов ВОД являются датчики на основе внутриволоконных брэгговских решеток. Такая решетка представляет собой брэгговское зеркало, а именно, периодическую структуру показателя преломления, изготовленную непосредственно в сердцевине оптического волокна. Подобная структура отражает свет в узком спектральном диапазоне.[3]

Если ЧЭ не является внутриволоконной брэгговской решеткой, а в качестве ЧЭ используется например кремниевая пластина заданной конфигурации, то очень важно обеспечить правильное сочленение чувствительного элемента и волокна. Сочленение должно обеспечивать надежный контакт волокна и чувствительного элемента, а также выдерживать заданное положение чувствительного элемента относительно торца и оси оптического волокна.

Оптические эффекты, характер которых зависит от интенсивности излучения, называют нелинейными.[4] Функционирование некоторых типов ВОД основано на ряде нелинейных эффектов возникающих при распространении излучения в волокне. Нелинейные эффекты в оптическом волокне усиливаются с ростом интенсивности поля, т. е. мощности потока излучения, приходящейся на единицу площади поперечного сечения сердцевины волокна.

3. РАМАНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ

Вынужденное рассеяние света представляет собой рассеяние на элементарных возбуждениях среды, индуцированных рассеиваемой волной. Поскольку процесс рассеяния стимулируется самим рассеиваемым оптическим излучением, рассеянное излучение характеризуется высокой степенью когерентности, узкими диаграммами направленности отдельных компонентов и интенсивностью, сопоставимой с интенсивностью падающего света. Таким образом, при возбуждении среды мощным световым источником происходит модуляция ее параметров, что приводит к амплитудной модуляции рассеянного света, а следовательно, к появлению в нем новых спектральных компонентов.

Комбинационное рассеяние связано с возбуждением новых колебательных и, в меньшей степени, вращательных энергетических уровней частиц среды.

Спектральный анализ рассеянного излучения обнаруживает присутствие линий, смещенных

вниз по частоте на величину, равную колебательным частотам облучаемого образца ($\nu_{\Pi} - \nu_v$). Этот тип рассеяния называется стоксовым рассеянием и изображен на рисунке 3.

В спектре рассеянного излучения присутствуют также частоты, равные сумме частот падающего излучения и колебательных частот вещества ($\nu_{\Pi} + \nu_v$), что видно на рисунке 3. Это так называемое антистоксово рассеяние, интенсивность которого на несколько порядков меньше интенсивности стоксовой компоненты.

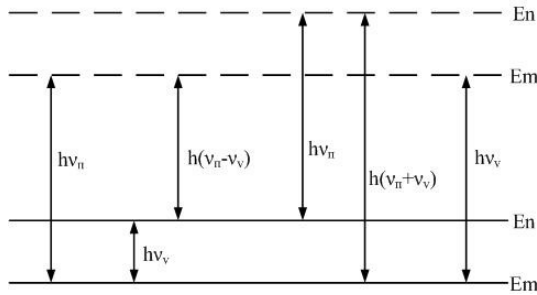


Рис.3. Схема энергетических уровней молекулы вещества и возможные энергетические переходы.

При спонтанном комбинационном рассеянии процесс преобразования падающей волны в антистоксово излучение зависит от наличия молекул в возбужденном состоянии с энергией E_n . Следовательно, вероятность этого события по сравнению с процессом стоксова рассеяния оказывается в $\exp(h\nu_v/k_b T)$ – раз меньше, где k_b – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура среды. Как видно из рис.3, стоксово рассеяние обогащает возбужденные состояния молекул среды, что в свою очередь способно приводить к росту интенсивности антистоксовых переходов. В связи с этим, на практике наблюдается запаздывание появления антистоксова излучения на 10-20 нс.

Как правило, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) наблюдается только при распространении мощных лазерных импульсов. Важнейшей особенностью вынужденного комбинационного рассеяния является то, что оно наблюдается только при достижении некоторого порогового значения плотности мощности волны накачки, величина которого зависит от характеристик среды.

Пороговые условия для ВКР определяются как такие значения мощности волны накачки на входе в волокно, при которых на выходе волокна мощность стоксовой волны оказывается равной мощности волны накачки [5]. Значение пороговой мощности волны накачки P_0 для стоксовой волны, распространяющейся вперед может быть определено как

$$P_0 = 16 \cdot S_{eff} / (g \cdot L_{eff}), \quad (1)$$

а для стоксовой волны распространяющейся назад

$$P_0 = 20 \cdot S_{eff} / (g \cdot L_{eff}), \quad (2)$$

где g – коэффициент усиления стоксовой волны, S_{eff} – эффективная площадь сечения волокна, L_{eff} – эффективная длина волокна определяемая как:

$$L_{eff} = (1/\alpha) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot L)), \quad (3)$$

где α – постоянная затухания (типичное значение $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$), L – длина волокна.

Таким образом, наблюдение эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) требует использования волн накачки со значительными уровнями мощности.

Техническая реализация принципов рамановского рассеяния воплотилась в волоконно-оптических датчиках распределенного измерения температуры «Distributed Temperature Sensing» (DTS), которая основывается на регистрации отражённых рамановских компонентов лазерного луча в оптическом волокне.

Применение DTS оправдано тогда, когда:

- использование электрических датчиков затруднено электромагнитным шумом в окружающей среде;
- контроль температуры электрическими датчиками опасен из-за возможности изменения измеряемой среды, например угрозой взрыва;
- планируется огромное количество датчиков на большой площади или неизвестно их корректное расположение.

Принцип действия DTS основан на ряде физических закономерностей. При вхождении лазерного импульса в оптическое волокно, в процессе его распространения в волокне происходит обратное рассеяние и его интенсивность постепенно убывает. Интенсивность и спектральный состав рассеивающегося излучения зависят от молекул оптического волокна.

Формула изменения интенсивности света, прошедшего сквозь слой вещества толщиной x запишется в виде

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (4)$$

где постоянная α – коэффициент ослабления света.

Коэффициент ослабления α равен сумме двух коэффициентов, характеризующих явления поглощения и рассеяния.

В оптических волокнах для РВОД поглощение мало и основную роль играют процессы рассеяния света. При этом имеет место упругое (релеевское) рассеяние света, происходящее без преобразования частоты света, то есть без обмена энергией между светом и веществом, и неупругое

рассеяние, сопровождающееся изменением частоты.

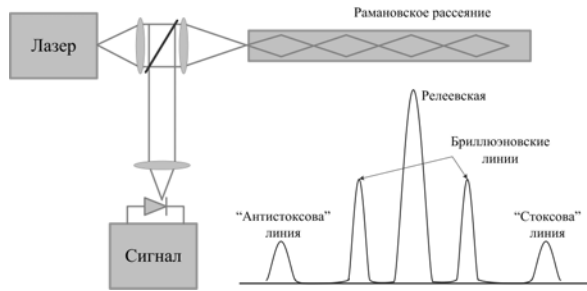


Рис.4. Схематическое изображение спектра рассеянного излучения, возникающего при распространении лазерного импульса в оптическом волокне.

Комбинационное рассеяние происходит при взаимодействии света с молекулами вещества, сопровождающимся переходами молекул из одного энергетического состояния в другое. При этом электронное состояние молекулы остается неизменным, лишь энергия ее колебаний увеличивается либо уменьшается на величину, равную разности энергий соседних колебательных уровней $\Delta E_{\text{кол}}$. Если частота падающего света равнялась ν_v , то в спектре рассеянного света наряду с линией при ν_P появляются симметрично расположенные линии при частотах

$$\begin{cases} \nu_{CT} = \nu_P - \nu_v \\ \nu_{ACT} = \nu_P + \nu_v \end{cases}, \quad (5)$$

где $\nu_v = \Delta E_{\text{кол}} / h$, ν_{CT} и ν_{ACT} – соответственно стоксова и антистоксова линии.

Антистоксова линия всегда имеет меньшую интенсивность, так как отношение заселенностей колебательных уровней с большей энергией меньше, чем с меньшей энергией.

Отношение двух линий комбинационного рассеяния зависит от температуры вещества:

$$\frac{I_{ACT}}{I_{CT}} = \left(\frac{\nu_{ACT}}{\nu_{CT}} \right)^4 \cdot \exp \left(- \frac{\Delta E_{\text{кол}}}{k_b \cdot T} \right), \quad (6)$$

где k_b – постоянная Больцмана.

Выразив отношение интенсивностей через $I = I_{ACT}/I_{CT}$ и логарифмируя выражение 6 получим:

$$\ln(I) = 4 \cdot \ln \left(\frac{\nu_{ACT}}{\nu_{CT}} \right) \cdot \left(- \frac{\Delta E_{\text{кол}}}{k_b \cdot T} \right), \quad (7)$$

отсюда температура равна:

$$T = \frac{\ln(I)}{4 \cdot \ln \left(\frac{\nu_{ACT}}{\nu_{CT}} \right) \cdot \left(- \frac{\Delta E_{\text{кол}}}{k_b \cdot T} \right)}, \quad (8)$$

Следовательно, имеется температурная зависимость отношения интенсивностей

антистоксовой компоненты к стоксовой и для определения температуры достаточно знать отношение этих интенсивностей.

4. РАССЕЯНИЕ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

Эффект рассеяния Мандельштама-Бриллюэна – это процесс нелинейного рассеяния, при котором свет рассеивается на акустической колебательной моде, приобретая сдвиг по частоте, соответствующий частоте этой моды. Рассеяние возникает за счет модуляции показателя преломления среды при распространении в ней звуковой волны.

В случае, когда световое излучение имеет высокую интенсивность и степень когерентности, в результате действия сил электрострикции возникает акустическая волна, которая тоже когерентна. В результате в среде появляются периодические изменения показателя преломления, эффективность рассеяния резко возрастает и наблюдается эффект вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). ВРМБ наблюдается только тогда, когда плотность мощности излучения превышает некоторый пороговый уровень. ВРМБ вызывает нелинейный характер изменения частотного сдвига от воздействия внутренних напряжений, поэтому для измерения деформации конструкций целесообразно ограничивать мощность оптического излучения и использовать только спонтанное рассеяние.

Произведем оценку мощности оптического излучения, при которой возникает ВРМБ. Порог возникновения ВРМБ – усиления $P_{\text{пор}}$ можно определить соотношением

$$P_{\text{пор}} \geq 21 \cdot A_{\text{eff}} / (L_{\text{eff}} \cdot g_B), \quad (9)$$

где A_{eff} – эффективная площадь сечения волокна, L_{eff} – эффективная длина взаимодействия определяемая как

$$L_{\text{eff}} = (1/\alpha) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot L)), \quad (10)$$

где L – длина волокна для непрерывного излучения и длина импульса для импульсного излучения, α – коэффициент потерь ОВ, g_B – коэффициент усиления при ВРМБ (типичное значение для волокон из плавленого кварца $g_B \approx 5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт).

Число 21 в выражении величина приближительная, поскольку она зависит от точного значения ширины спектра ВРМБ-усиления [4]. Она может возрастать в 1-2 раза в зависимости от того, сохраняет ли стоксова волна и волна накачки поляризацию в ОВ или нет. Случаю полной деполаризации соответствует увеличение численного фактора в 2 раза. Если взять обычные значения параметров ОВ для

оптической связи на 1550 нм: $\alpha=0,2$ дБ/км, $L=40$ км, $A_{\text{эф}}=50$ мкм², $g_B=5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт, то пороговая мощность будет составлять 2 мВт.

Низкий порог мощности оптического излучения, при котором возникает ВРМБ, делает ВРМБ доминирующим нелинейным процессом в ОВ. Это означает, что при построении средств измерений необходимо учитывать возможность возникновения ВРМБ.

При спонтанном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна частоты обеих рассеянных волн (стоксовой и антистоксовой) отличаются от частоты излучения накачки на величину частоты акустической волны ν_a . Изменение частоты акустической волны обусловлено ее зависимостью от температуры и механического напряжения оптического волокна. Соответствующие коэффициенты, определяющие зависимость сдвига частоты акустической волны от температуры (K_T) и относительно механической деформации (K_ε), определяются выражениями:

$$K_T = \frac{d}{dT} \nu_a = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \cdot \left(V_a \cdot \frac{d}{dT} n + n \cdot \frac{d}{dT} V_a \right) \quad (11)$$

$$K_\varepsilon = \frac{d}{d\varepsilon} \nu_a = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \cdot \left(V_a \cdot \frac{d}{d\varepsilon} n + n \cdot \frac{d}{d\varepsilon} V_a \right) \quad (12)$$

где $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны накачки, V_a – скорость акустической волны в волокне, n – показатель преломления ОВ.

Следовательно, использование метода бриллюэновской рефлектометрии перспективно для получения распределения натяжения и температуры вдоль волокна при невысоком уровне мощности оптического излучения.

В настоящее время метод бриллюэновской рефлектометрии применяется в бриллюэновском оптическом импульсном анализаторе (BOTDA), использующем явление ВРМБ и бриллюэновском оптическом импульсном рефлектометре (BOTDR), использующем явление спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. BOTDA необходимо подключать к обоим концам волокна, что не пригодно для тестирования линий передачи, например, после землетрясений. BOTDR лишен этого недостатка, он подключается только к одному концу волокна. В BOTDR регистрируется излучение, рассеянное на тепловых флуктуациях показателя преломления (акустических фонах), а так как время жизни акустического фона мало по сравнению со временем измерений, то амплитуда и фаза волн, рассеянных на этих неоднородностях эффективно усредняются, следовательно рефлектограмма не зашумлена.

4. СОПРЯЖЕНИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ С

ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОМПЬЮТЕРОМ (ПК) И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При разработке контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) часто возникает необходимость в передаче результатов измерений для окончательной обработки в персональный компьютер (ПК). Для мобильных средств измерений обычно используется портативный компьютер – ноутбук. Особенности ноутбуков являются:

- отсутствие возможности подключать платы расширения в шину PCI,
- отсутствие COM портов;

Наиболее перспективным интерфейсом современных компьютеров, в том числе и ноутбуков, является USB.

Надежность, помехозащищенность на аппаратном уровне, возможность питания подключаемых устройств от самой шины высокая пропускная способность делают USB очень выгодным средством для сопряжения контрольно-измерительной аппаратуры с ПК.



Рис.5. Сопряжение КИА и ПК

Обычно блок обработки и визуализации данных занимает существенную часть финансовых затрат на разработку. Соединив вычислительные мощности ПК и КИА, мы сможем значительно снизить стоимость разработки, а также максимально визуализировать получаемые данные, в удобном для пользователя виде изменять алгоритмы обработки сигнала и вести полный протокол измерений.

Имея мощный аппарат обработки сигналов, такой как ПК, основную тяжесть интеллектуальной нагрузки в процессе измерений можно переложить с собственно ВОД на устройство обработки их сигналов, что значительно снизит стоимость их изготовления и эксплуатации, а сами ВОД станут проще как конструктивно, так и в изготовлении. Измеряемыми параметрами ВОД в которых выходной сигнал формируется в виде временной последовательности оптических импульсов могут служить число импульсов, частота их следования или временные интервалы между импульсами.

Одним из способов выделения сигнала из шума является накопление принятых сигналов. Накопление состоит в усреднении сигналов, полученных при наличии помех. При увеличении времени накопления точность измерения параметров возрастает, но одновременно происходит старение данных, вызванное изменением значений измеряемых параметров. Отношение сигнал/шум линейно увеличивается с числом повторений N , которое определяется как:

$$N = f \cdot t_{\text{изм}} \cdot \Delta L / L, \quad (13)$$

где f – частота следования импульсов; $t_{\text{изм}}$ – время измерения; ΔL – пространственное разрешение, L – длина волокна.

Максимальная частота следования импульсов f ограничена временем распространения импульса в волокне и определяется как

$$f = c / 2 \cdot n \cdot L \quad (14)$$

Таким образом, число повторений определяется как:

$$N = \frac{c \cdot t_{\text{изм}} \cdot \Delta L}{2 \cdot n \cdot L^2} \quad (15)$$

Выбор оптимального соотношения между временем накопления и точностью измерения для каждой задачи носит индивидуальный характер и выбирается непосредственно перед измерением.

Подключив выход фотоприемного устройства к блоку АЦП, мы сможем регистрировать все изменения сигнала приходящего из волоконно-оптического тракта. Для дальнейшей обработки получаемого сигнала требуется с помощью устройства сопряжения отправить его для дальнейшей обработки в ПК. Для этого нам необходимо подключить АЦП к микроконтроллеру, который либо имеет прямую поддержку интерфейса USB, например микроконтроллер Atmel AT89C5131, либо имеет вспомогательный интерфейс ввода-вывода, например RS-232.

Но возникают ситуации, когда применение микроконтроллера с прямой поддержкой USB невозможно или навыки программирования микроконтроллеров ограничены знанием только какого-либо одного микроконтроллера. Тогда, в случае поддержки микроконтроллером например интерфейса RS-232 можно использовать микросхему FT232BM – разработку фирмы FTDI, представляющую собой однокристалльный асинхронный двунаправленный преобразователь USB в последовательный интерфейс. Применение этой микросхемы оправдано для тех, кто не хочет тратить время на изучение и создание сложных систем, основанных на других микроконтроллерах, и кому необходима простота реализации и не большие скорости передачи данных. Пользователю этой микросхемы не

требуется никаких знаний об устройстве и работе USB: драйверы создадут впечатление, что обмен идет через обычный COM порт, что и является самой важной характеристикой этой микросхемы.

Стоит также отметить, что многие микроконтроллеры имеют встроенные АЦП, но скорость обработки данных и разрешающая способность встроенных АЦП зачастую не отвечают необходимым требованиям.

Цифровая обработка данных от ВОД является достаточно сложной задачей, так как имеется большой объем информации, а получаемый сигнал иногда необходимо выделить практически на уровне шумов. Зачастую используют усредненные вычисления, пренебрегая малыми возмущениями. При анализе данных пришедших на вход фотоприемного устройства важно получить полное представление о полученном сигнале, где нельзя пренебречь случайными отклонениями, а полезный сигнал необходимо выделить из шума. Достаточно перспективными являются методы вейвлет-преобразований и фрактального анализа получаемых данных, которые помогут при высоком уровне помех выделить периодические сигналы и найти их период. Вейвлет-преобразование является обобщением спектрального анализа, типичный представитель которого – разложение в ряд Фурье. В отличие от преобразований Фурье, вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах. Фурье анализ не отличает сигнал, представляющий собой сумму двух синусоид, от синусоид включающихся последовательно. Вейвлеты же выделяют из сигнала компоненты разных масштабов так, что каждый компонент анализируется с той степенью детальности, которая соответствует его масштабу.

Интегральное вейвлет-преобразование функции $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ носит вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (16)$$

при $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.

где a – масштаб (его аналог в анализе Фурье период гармонического колебания), b – сдвиг, задающий временную локализацию вейвлета (в Фурье анализе аналога не имеет), $\psi(t)$ – вейвлет-функция.

Путем сдвига по независимой переменной ($t-b$) вейвлет имеет возможность перемещаться по всей числовой оси произвольного сигнала, а путем изменения масштабной переменной ' a ' (в фиксированной точке ($t-b$) временной оси)

"просматривать" частотный спектр сигнала по определенному интервалу окрестностей этой точки.

Графическое отображение вейвлетной поверхности реального физического процесса изображается на рисунках, как правило, в виде изолиний или условными цветами. Вид поверхности определяет изменения во времени спектральных компонент различного масштаба и называется частотно-временным спектром. Вейвлет-спектр представляет собой двухмерную картинку, где по оси ординат откладываются значения масштаба 'a', а по оси абсцисс — координата (время) сигнала.

Вейвлет-функциями могут быть самые различные функции, ограниченные по времени и местоположению на временной оси, и имеющие спектральный образ, в определенной степени локализованный на частотной оси. Непременное условие того, что функция является вейвлетом — это наличие нулевого начального момента, но зачастую бывает важно и наличие нулевых значений m — старших моментов:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) t^m dt = 0 \quad (17)$$

Наиболее популярны вейвлет-функции основанные на производных функции Гаусса. Общий вид функции Гаусса носит вид:

$$\psi_m(t) = (-1)^m \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \frac{d^m}{dt^m} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma^2}}, \quad (18)$$

где μ_1 — первый начальный момент, σ — среднеквадратическое отклонение.

Главная особенность вейвлет-преобразований в том, что они позволяют показать локальную структуру сигнала (вплоть до разрывов 1-го рода — скачков) наряду с глобальной, построенной усреднениями по большим временным интервалам, т.е. посредством вейвлет-преобразований возможно провести спектральный анализ локальных возмущений. Метод вейвлет-преобразований становится неотъемлемой частью обработки сложных сигналов и позволяет существенно дополнить характеристики сигналов, получаемые обычными статистическими методами.

Например, анализ данных от РВОД затруднен огромным уровнем помех. Выделение полезного сигнала из сигнала содержащего шум реализуется с помощью различных фильтров. Существуют способы удаления шумов с помощью частотных, полосовых и резонансных фильтров. Но кроме указанных выше существует вейвлет-фильтрация, достоинствами которой является то, что вейвлет-фильтрация имеет возможность ограничения уровня шума во всех частотных диапазонах, в том

числе и в эффективной полосе частот полезного сигнала, что, к примеру, принципиально невозможно при частотной фильтрации. Благодаря этому преимуществу, теоретически, результаты фильтрации с использованием вейвлетов должны быть лучше.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.А. Демьянов, Ю.Ф. Зиньковский, М.И. Прокофьев. Измерительные преобразователи на основе волоконно-оптических датчиков. — Фотон-Экспресс, 6(46) 2005.
2. В.Т. Потапов. Волоконно-оптические технологии в контрольно-измерительной технике. Фотон-Экспресс, 5(37) 2004.
3. В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугодинов, В.И. Поспелов. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении. — Фотон-Экспресс, 6(46) 2005.
4. Г. Агравал. Нелинейная волоконная оптика— М.: «МИР» 1996 г
5. Проведение исследований и разработка рекомендаций по метрологическому обеспечению разработки, производства и эксплуатации измерительных преобразователей ВОД рефлектометрического типа для измерения деформации и температуры, ФГУП «ВНИИОФИ», 2003.
6. М.Я. Яковлев, В.Н. Цуканов, В.Н. Великов, В.А. Кузнецов, А.Б. Пнев. BOTDR в ВОСП. — Фотон-Экспресс, 5(45) 2005.
7. ГОСТ РВ 50899-96 Сети сбора данных волоконно-оптические на основе волоконно-оптических датчиков. Общие технические требования.
8. А.М. Мамедов, В.Т. Потапов, Т.В. Потапов, Е.К. Смуреєв. Одноволоконные распределенные волоконно-оптические датчики физических величин и полей. — Фотон-Экспресс, 6(46) 2005.
9. П.В. Агуров. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
10. В.В. Витязев. Вейвлет анализ временных рядов. Учебное пособие. СПб, Изд-во С.—Петербургского университета, 2001.
11. А.В. Давыдов. Вейвлетные преобразования сигналов, 2004.