

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКЛ-СТРУКТУР В ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ

О. Горбачев, к.т.н., МПА "ЕВРОКАБЕЛЬ", info@euro-cable.ru

Использование системы диагностики на основе оптического волокна имеет ряд преимуществ перед некоторыми иными устройствами охраны периметра территорий, так как оптический кабель можно использовать во взрывоопасной среде. Чувствительным элементом разработанной распределенной системы диагностики является волоконно-оптический кабель, который реагирует на движение, вибрацию и деформацию по всей длине. В основу работы системы положен метод, основанный на исследовании спекл-структуры оптических волокон.

Проблема разработки и реализации диагностики и контроля распределенных объектов, к которым относятся и линии связи, требует эффективных решений на доступной элементной базе. Одним из методов дистанционного контроля больших зданий и территорий, линий и оборудований связи является метод, основанный на исследовании спекл-структуры оптических волокон.

Спекл-структуры (от англ. *speckle* – крапинка, пятнышко) являются результатом интерференции волн от отдельных неоднородностей среды, в которой распространяется лазерное излучение. Данные спекл-картины снижают качество изображения, но вместе с тем они могут служить носителем полезной измерительной информации. Это создает предпосылки для их широкого применения в решении научно-технических задач в области высокоточных исследований и при контроле вибрации и деформации оптического кабеля [1].

Спекл-структура в рассеянном поле формируется при когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких как прозрачная среда с флуктуирующим в пространстве показателем преломления или же шероховатая поверхность. Такие отражающие и пропускающие объекты называются диффузными объектами (микронеровности,

существующие в пределах допуска на изготовление оптического волокна) или диффузорами. Спекловые поля, подобные получающимся при освещении диффузоров, возникают и при пропускании когерентного света через многомодовые волоконные световоды. Причина их появления в том, что на выходе многомодовых волоконных

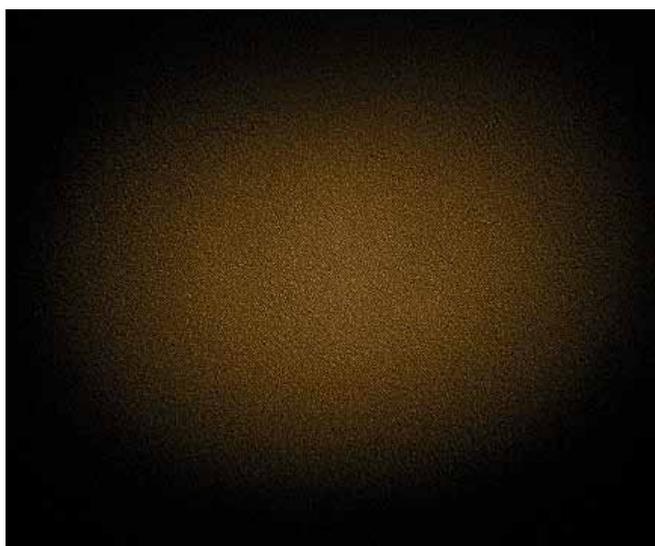


Рис. 1. Спекл-картина на выходе из многомодового оптического волокна

световодов интерферируют поля большого числа направляемых мод со сложным пространственным распределением амплитуды по поперечному сечению световода и практически произвольными фазами.

Внешние деформационные воздействия на многомодовое оптическое волокно приводят к изменению пространственного расположения формируемых ими спеклов. Анализируя такие изменения, можно получить информацию о величине и параметрах внешних воздействий на оптическое волокно. Если пространственное распределение интенсивности спеклового поля при начальном состоянии объекта $I_1(x,y)$ – исходное распределение, а $I_2(x,y)$ – текущее распределение соответственно, то наличие разницы между ними будет свидетельствовать о наличии внешних воздействий на формирующий спеклы объект. Оценивая степень различия между функциями $I_1(x,y)$ и $I_2(x,y)$, можно также попытаться установить характер и величины этих воздействий.

Иногда измененное текущее распределение $I_2(x,y)$ спеклового поля может совпадать со сдвинутым на расстояние α исходным распределением $I_1(x,y)$. Такой тип изменения спекл-структуры называется трансляцией. Трансляция спеклов может наблюдаться при поперечных смещениях многомодового световода как единого целого в том случае, если перемещение не сопровождается изменением фазы направляемых по нему мод. Данный режим изменения спекл-структуры редко реализуется при использовании оптического волокна в качестве чувствительного

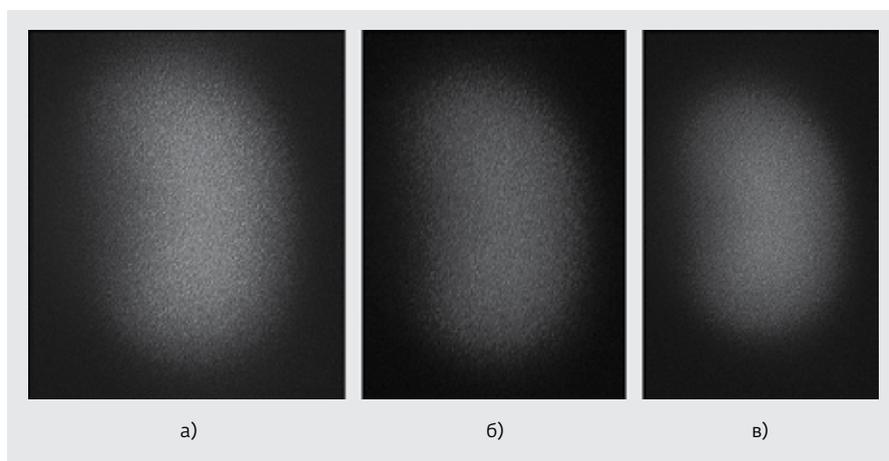


Рис.2. Спекл-структуры на выходе из многомодового оптического волокна: а) – спекл-структура при длине волокна 50 м; б) – спекл-структура при длине волокна 150 м; в) – спекл-структура при длине волокна 200 м

элемента фазовых волоконно-оптических датчиков.

Проведем исследование среднего размера спекла (размер спекла определяется размером фильтрующей апертуры). Апертура (*apertura* – отверстие) – характеристика оптического прибора, описывающая его способность собирать свет и противостоять дифракционному размытию деталей изображения на выходе из оптического волокна при распространении когерентного излучения в нем. Предположим, что спекл-картина формируется в результате равномерного освещения диффузора (например, матового стекла) шириной L . Спекл-структура, наблюдаемая в плоскости на расстоянии z от диффузора, представляет собой суперпозицию интерференционных картин, возникающих при рассеянии света каждой парой точек на диффузоре. Две любые точки, разделенные расстоянием l , дают интерференционные полосы с частотой $\nu = l/\lambda_z$. Наиболее тонкие полосы, полосы с наибольшей частотой $\nu_{\max} = L/\lambda_z$, будут образованы

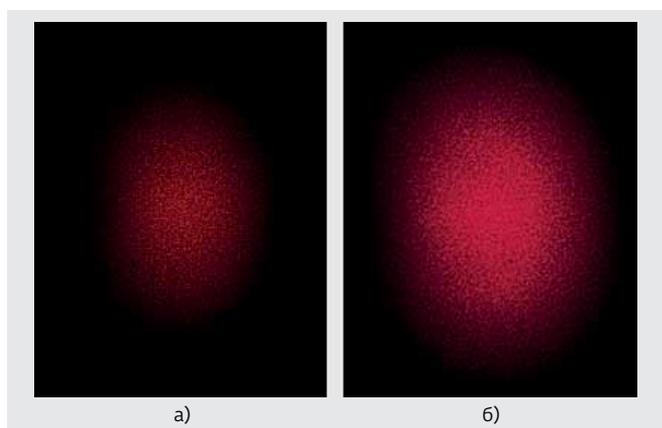


Рис. 3. Спекл-структуры на выходе из многомодового оптического волокна: а) – спекл-структура при длине волокна 700 м; б) – спекл-структура при длине волокна 300 м

крайними точками диффузора. Для меньших расстояний l существует большое количество пар точек, дающих полосы с частотой, определяемой расстоянием между ними. Число пар таких точек, разделенных расстоянием l , пропорционально $L-l$ [2]. Различные интерференционные полосы будут

иметь случайные по отношению друг к другу фазы, поэтому при формировании усредненной освещенности вклад от интерференционных картин с разной частотой полос пропорционален соответствующему числу пар рассеивающих точек. Поскольку число последних пропорционально разности $L-l$, которая в свою очередь пропорциональна $v_{\max} - v$, распределение освещенности по частоте полос будет линейным. Средняя частота полос равна $\langle v \rangle = 1/3(L/\lambda_z)$. Следовательно, распределение освещенности будет равно $I(y) = 1 + \cos(2\pi Ly/3\lambda_z)$. За ширину спекла принимают расстояние между точками, где I падает до половины своего максимального значения, т.е. $1,5(\lambda_z/L)$.

Таким образом, размер спекла равен $\alpha_s = 1,5\lambda_z/L$. Этот результат отличается от данных, опубликованных в работе [4], в которой описана волоконно-оптическая система "Сова". В этой работе средних размер спекла α_s определяли как $\alpha_s = 3\lambda_z/D$, где 3 – поправочный коэффициент, полученный на основе вероятностного пространственно-частотного анализа; λ – средняя длина волны света; Z – расстояние от объекта до плоскости наблюдения; D – диаметр освещенной области. Данные

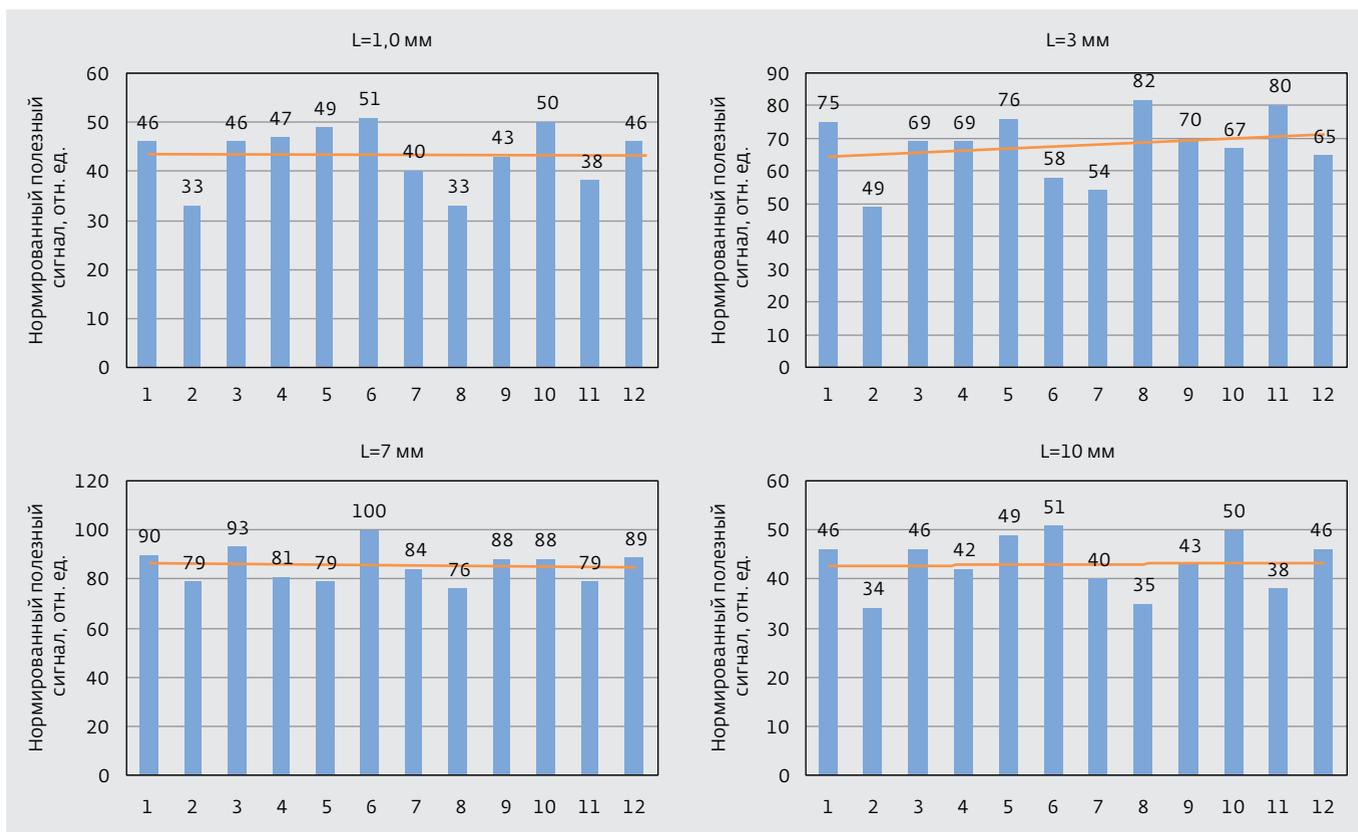


Рис.4. Гистограммы распределения нормированного полезного сигнала при установке различных расстояний между выходным торцом оптического волокна и фотоприемником (по горизонтальной оси расположены номера испытаний)



о среднем размере спеклов дают возможность только грубой оценки величины смещения объектов в случае, когда изменение спекл-картины имеет характер трансляции [3]. И новое выражение отражает зависимость размера спекла α_s от рабочих параметров более точно, чем в работе [4].

Из-за трансляции спеклов коэффициент корреляции спекл-структур уменьшается до нуля задолго до того, как смещение становится равным диаметру светового пучка D . В дальней зоне наблюдения изменения корреляционной функции в основном будут обусловлены непрерывной сменой рассеивающих центров в области освещения. В таких условиях движение спеклов не будет согласованным. Отдельные спеклы в дальней зоне наблюдения будут перемещаться в произвольных направлениях, изменять форму вплоть до полного исчезновения и возникновения новых спеклов. Такой тип изменений спекл-структуры классифицируется как стохастический (рис.1).

При внешних воздействиях на многомодовое оптическое волокно с неподвижно закрепленным выходным торцом эффект изменения спеклов реализуется независимо от расстояния до плоскости наблюдения (рис.2)

Рассмотрим спекл-картину на выходе из многомодового оптического волокна, и последовательно будем учитывать внешние воздействия на различных расстояниях между выходным торцом оптического волокна и фотоприемника. Наблюдаемая спекл-картина вызвана только интерференцией волн от отдельных неоднородностей поверхности. Пусть диаметр освещенной области равен D , а радиус пространственной когерентности равен $\rho_c \approx \lambda/\theta$, где θ – угловой размер освещающего источника, λ – средняя длина волны света.

При этом $\rho_c > D$, где D – диаметр освещенной области, равно как и разность оптических путей $l_c = \lambda_2/\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – ширина спектрального интервала излучения. Введем в рассматриваемую систему внешнюю негативную составляющую, заключающуюся в наличии неоднородностей в среде распространения. Вследствие чего получим дополнительный источник формирования спекл-шума на выходе из многомодового оптического волокна. При этом среднее время мерцания единичного спекла $\tau = \alpha/v$, где α – средний размер спекла ($\alpha = \lambda_z/D$), где z – расстояние между плоскостями рассеяния и наблюдения.

Теперь спекл-картина складывается из интерференции двух независимых реализаций спекл-поля. Динамика среды распространения



в дальней зоне вызовет стохастический эффект спекл-картины. При различных воздействиях на многомодовое оптическое волокно мы получаем модель, достаточно точно отражающую природу формирования спекл-картины. В данном случае изменения спекл-картины позволяют оценить скорость движения неоднородностей среды. В результате исследований нами получены уникальные экспериментальные данные (рис.3): на больших длинах оптического кабеля обнаружены спекл-структуры, формирующиеся при нормированном воздействии на частоте 300 Гц.

Сравнительный анализ экспериментальных данных, которые отражают изменения спекл-структур, происходящие вследствие апертурных эффектов, параметров оптического волокна, лазера, фотоприемника и внешнего воздействия на чувствительный элемент, позволили выявить ряд характерных зависимостей. Изменения спекл-структур зависят от определенных внешних воздействий на оптическое волокно: установлена слабая зависимость среднеквадратичной интенсивности и заметная зависимость пространственно-временной флуктуации интенсивности некоторых областей спеклов. Выявлена зависимость от частоты, координат и силы внешнего воздействия (рис.4). В испытаниях изменяли расстояние L между двумя плоскостями – плоскостью рассеяния (плоскость выходного торца оптического волокна) и плоскостью наблюдения. Оказалось, что наиболее сильное изменение уровня сигнал-шум наблюдается в случае, когда расстоянию между плоскостями рассеяния и наблюдения составляет 70 мм.

Обработка сигналов одноволоконных интерферометрических систем, формирующих спекл-структуры на выходе волоконного световода, позволила разработать новые методы измерений. Они способны адаптироваться к случайным

изменениям пространственной структуры спекл-модулированных волн, если они вызваны неконтролируемыми внешними воздействиями, и обеспечивать режим реального времени в случае регистрации динамических спеклов. В свою очередь владение такими методами позволило создать эффективные технические средства контроля деформации и внешнего воздействия на оптическое волокно и модернизировать волоконно-оптическую систему диагностики.

Чувствительным элементом разработанной распределенной системы диагностики является волоконно-оптический кабель, который реагирует на движение, вибрацию и деформацию по всей длине. Для регистрации внешних воздействий необходимо существование контакта кабеля с контролируемым объектом, будь то ограждение, строительная конструкция, линия связи, периметр территории и т.д. Использование системы диагностики на основе оптического волокна имеет ряд преимуществ перед некоторыми иными устройствами охраны периметра территорий, так как оптический кабель можно использовать во взрывоопасной среде. Существует ряд других преимуществ оптического кабеля: это и высокая механическая прочность, и малые размеры, а также необходимая стойкость к вибрациям и механическим ударам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларин Ю.Т. Оптические кабели. – М.: Престиж, 2006.
2. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980.
3. Короленко П.В. Оптика когерентного излучения. – Москва, 1997.
4. Горбачев О.В. Практическое использование интерференционных явлений в оптических кабелях. Волоконно-оптическая система "Сова". – Фотон-Экспресс, 2006, №1, с. 38-43.

II ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ

23–25 января 2013 года, Москва, НИЯУ МИФИ.

Тематика конференции: когерентная и нелинейная оптика; взаимодействие излучения с веществом и квантовая оптика; волоконная и интегральная оптика, элементная база фотоники; оптика кристаллов и оптические материалы; голография и синтез дифракционных оптических элементов, цифровая

оптика; оптические методы и оптоэлектронные устройства обработки информации.

В программе конференции: Школа молодых ученых, секционные заседания, стендовая сессия.

Организационный комитет конференции

Председатель организационного комитета конференции: А.Н. Петровский – Национальный исследовательский ядерный университет

"МИФИ"; зам. председателя: В.В.Иванов – Президиум Российской академии наук; ученый секретарь: В.Г. Родин – Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".

Адреса и телефоны для справок: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, НИЯУ МИФИ, комн. Э-005; тел.: (499) 324-74-03, факс: (499) 324-74-03; E-mail: holo@pico.mephi.ru, holo_mephi@mail.ru