

ЦИФРОВАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Г.Каленков, А.Штанько, к.ф.-м.н.,
ООО "Микроголо", info@microholo.com

Использование в спекл-интерферометре в оптической схеме диффузно рассеянного излучения в качестве опорного пучка значительно расширяет возможности метода. Статью дополняют результаты реальных экспериментов по исследованию деформации микроструктуры поверхности.

Развитие цифровых средств регистрации и обработки изображений существенно расширяет возможности известных методов спекл-интерферометрии [1, 2], использовавшихся ранее для измерения полей перемещений и углов поворота диффузно отражающих объектов. Запись спекл-структур с помощью ПЗС-матриц вместо неоперативной регистрации на фотоэмульсию или на низкочувствительный фототермопластический материал позволяет получать спекл-интерферограммы в режиме реального времени. В настоящей работе обсуждаются экспериментальные аспекты цифровой регистрации спекл-интерферограмм в реальном времени и отмечаются новые интересные возможности, которые открывает данная методика.

С экспериментальной точки зрения преимуществом методов корреляционной спекл-интерферометрии перед голографической интерферометрией является существенное снижение пространственной частоты регистрируемых полей. В результате картина интерференции опорного и предметного волновых полей может быть записана с помощью матричного фотоприемника и введена в

компьютер для дальнейшей обработки. В то же время оптические схемы спекл-интерферометров, как правило, не имеют существенных отличий от схем голографических интерферометров, так как тоже требуют формирования опорного и предметного пучков и их наложения в плоскости регистратора. Поэтому на практике схемы спекл-интерферометров оказываются громоздкими, требующими виброзащиты и тщательной юстировки. Однако схема спекл-интерферометра может быть существенно упрощена, если воспользоваться тем фактом, что в качестве опорного пучка в спекл-интерферометре можно использовать диффузно рассеянное поле.

Такая упрощенная схема представлена на рис.1. Она предназначена для регистрации перемещений, перпендикулярных поверхности объекта. В ней формирование опорного и предметного пучков осуществляется за счет деления по волновому фронту.

Пучок лазерного излучения 1 расширяют системой из двух линз 2 и 3. Цилиндрическая линза 3 предназначена для дополнительного расширения пучка в горизонтальном направлении. Расширенный

пучок освещает исследуемый объект 4 вместе с установленным рядом с ним отражающим диффузным рассеивателем 5. С помощью фотообъектива 6 формируют изображение объекта в плоскости ПЗС-матрицы 7. Отверстие диафрагмы объектива делают малым, например 1:16, чтобы размер элементов спекл-структуры изображения в плоскости приемной матрицы превосходил бы шаг пикселей. В качестве опорного волнового поля используют излучение, отраженное от диффузного рассеивателя 5. Для введения его в объектив 6 и наложения на объектное поле используют дифракционную решетку 8 с углом дифракции в первом порядке, равным среднему угловому расстоянию между объектом 4 и рассеивателем 5. Дифракционную эффективность решетки подбирают так, чтобы обеспечить равенство интенсивностей нулевого и первого порядков дифракции. Этим требованиям удовлетворяют только фазовые решетки, полученные, например, голографическим способом. В качестве диффузного рассеивателя используют светлую диффузно-отражающую пластину, размер которой несколько превосходит размер

объекта. При этих условиях в плоскости приемной матрицы на изображение объекта, сформированное в нулевом порядке дифракции, накладывается изображение диффузного рассеивателя, сформированное в первом порядке дифракции.

В результате интерференции этих двух полей возникает новая спекл-структура, конкретная реализация которой определяется разностью фаз $\Delta\phi$ интерферирующих полей. Изменение разности фаз $\Delta\phi$ на величину $(2m+1)\pi$, где m – целое число, приводит к полной декорреляции указанной интерференционной спекл-структуры, в то время как при изменении разности фаз $\Delta\phi$ на величину $2\pi m$ спекл-структура сохраняется, то есть оказывается коррелированной с первоначальной. Это свойство используется для получения спекл-интерферограммы, отображающей поле перемещений поверхности объекта.

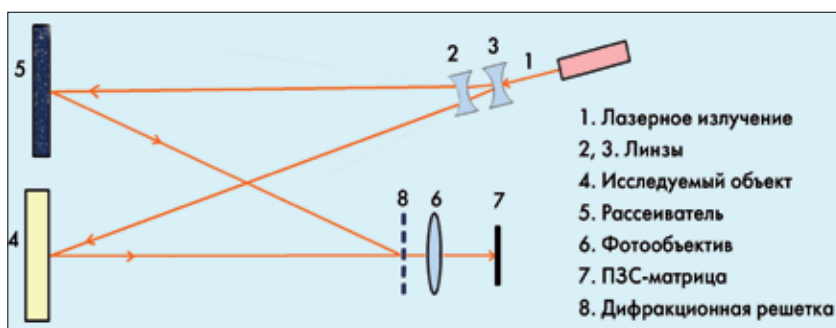


Рис.1. Оптическая схема спекл-интерферометра

С этой целью производят двукратную регистрацию спекл-структуры – до и после деформирования объекта. Оба изображения вводят в компьютер и производят поэлементное вычитание их интенсивностей. В качестве меры степени корреляции двух введенных изображений используют усредненное по малой области значение $|\Delta I|$ модуля поэлементной разности их интенсивностей. В тех зонах, где корреляция сохранилась, среднее значение $|\Delta I|$ будет близко к нулю, а там, где

корреляция нарушилась, значение $|\Delta I|$ будет существенно отлично от нуля. Таким образом, на разностном изображении черные полосы будут являться геометрическим местом точек, в которых изменение фазы объектного волнового поля вследствие его деформации кратно 2π . Если направления освещения и наблюдения объекта близки к нормали к его поверхности, то указанное изменение фазы будет происходить при перемещении поверхности на величину $\lambda/2$ вдоль

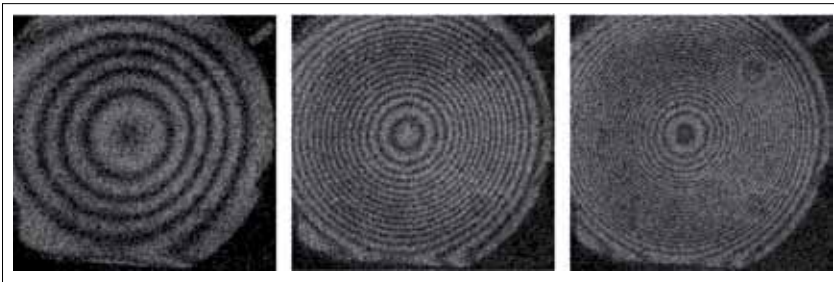


Рис.2. Визуализация динамики деформации мембраны

нормали. Эта величина и представляет собой цену полосы на полученной спекл-интерферограмме.

Современная цифровая техника позволяет вводить в компьютер спекл-структуры в режиме видеосъемки и оперативно вычислять меру их корреляции, что открывает возможность регистрации и наблюдения полей деформаций в реальном времени. Такой метод наблюдения был осуществлен нами с помощью описанного выше спекл-интерферометра (рис.1).

В качестве регистрирующего устройства была использована монохромная камера с матрицей Kodak, 1288×1032, площадью ~1см². Объектом исследования служила зажатая по контуру круглая стальная мембрана диаметром 120 мм, деформируемая избыточным давлением воздуха с внутренней стороны. Изображение мембраны проецировал на приемную матрицу фотообъектив (фокусное расстояние 50 мм). Пространственная частота дифракционной решетки, совмещающей изображения объекта и формирующего опорное поле диффузного рассеивателя, составляла 350 мм⁻¹. Источником излучения служил твердотельный одномодовый лазер (SLM, TEM₀₀) MH-GreenLight мощностью 80 мВт с длиной волны 0,532 мкм. При использовании малого значения диафрагмы (1:16) оптимальная экспозиция составляла 1 с.

Для получения интерферограмм в реальном времени в компьютер вводили первый кадр, называемый кадром срав-

нения, на котором была зафиксирована исходная спекл-структура, соответствующая недеформированному состоянию объекта. Затем с интервалом времени в 1 с камера регистрировала текущие спекл-структуры, отображающие деформирование объекта. На рис.2 приведены три кадра интерферограмм, последовательно отображающих плавное нарастающий прогиб мембраны.

Эти кадры в реальном времени вводились в компьютер, и вычислялась мера их корреляции с первым кадром. Время, затрачиваемое на такое вычисление, было существенно меньше, чем время экспонирования одного кадра. Результат вычислений в виде интерферограммы немедленно выводился на монитор. В итоге можно было наблюдать фильм, отображающий процесс деформирования объекта.

Описанный спекл-интерферометр реального времени позволяет существенно расширить возможности использования спекл-интерферометрии для исследования полей перемещений объектов. До настоящего времени фактором, ограничивающим диапазон исследуемых полей перемещений, являлось падение контраста интерференционных полос на интерферограмме, которое наблюдалось при увеличении их пространственной частоты в ходе нагружения объекта. Чтобы гарантировать хороший контраст полос на интерферограммах, получаемых методом двойной экспозиции, приходилось ограничиваться сравнительно малыми уровня-

ми деформаций объекта. Наблюдение интерферограмм в реальном времени позволяет вводить обновление исходного кадра сравнения. Каждый раз, как только контраст интерферограммы падает до некоторого порогового уровня, берется новый кадр сравнения из текущих кадров. Теперь перемещения измеряются относительно нового начала отсчета. При этом информация о предыдущем интервале нагружения объекта относительно первого кадра сравнения не пропадает – она остается в памяти компьютера. Подобное изменение начала отсчета можно производить многократно и по завершении цикла нагружения вычислить полную величину перемещений путем суммирования данных по серии интерферограмм, полученных во всей последовательности кадров сравнения. В результате окажется возможным непрерывно наблюдать процесс деформирования объекта вплоть до его разрушения.

Методика обновления кадра сравнения существенно расширяет также возможности спекл-интерферометрии при исследовании полей перемещений в условиях, когда вследствие механических или химических процессов происходит постепенное изменение микроструктуры поверхности исследуемого объекта, что также вызывает падение контраста интерференционных полос. Примером таких процессов являются пластические деформации и коррозия. Своевременное обновление кадра сравнения в этих случаях позволит сохранять информацию о процессе деформирования в течение любого времени наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duffy D. Moire Gauging of In-plain Displacement Using Double Aperture Imaging. – Appl. Opt. 1972. v. 11. № 8.
2. Leendertz J. A. – J. Phys. E: Sci.Instrum. 1970, v. №3.