

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАНОРАМНЫХ СРЕДСТВ ВИБРОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ

О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Шапошников, Ю.Д. Щеглов

Практически любой реальный объект: деталь, узел, агрегат или всё изделие в целом характеризуется дискретным спектром собственных резонансных частот. Резонансные колебания объектов (за редким исключением) нежелательны, т.к. вызывают увеличение уровня шума и могут стать причиной разрушения объекта.

С учётом большого разнообразия геометрических форм и упругих свойств реальных объектов, а также возможного наличия скрытых дефектов конкретного образца объекта, расчётно-аналитическое решение задачи определения собственных форм и частот колебаний в большинстве случаев нерационально или нецелесообразно. Это стало совершенно очевидным в последние годы, когда наиболее ярко проявилась общая тенденция в технике - стремление к высоким параметрам наряду с постоянно растущими требованиями к улучшению показателей надежности и снижению металлоемкости машин.

Поэтому экспериментальное исследование формы собственных колебаний конкретного объекта представляет собой важную и актуальную инженерно-техническую операцию, позволяющую рационально спланировать конструктивные, технологические, эксплуатационные и иные мероприятия, обеспечивающие увеличение надёжности и рабочего ресурса объекта, снижение уровня звукового давления, развиваемого им в работе.

Наиболее простым и исторически первым способом исследования формы собственных колебаний является способ наблюдения так называемых фигур Хладни (E.F. Chladni; 1787) [1]. Способ состоит в том, что поверхность горизонтально установленного и механически возбужденного объекта (пластины) посыпается тонким слоем песка. При подходе к резонансу песок начинает интенсивно перемещаться по поверхности пластин, концентрируясь в узлах данной формы колебаний, т.е. в тех местах, которые в процессе колебаний остаются неподвижными. После более или менее продолжительного выдерживания пластины на резонансе на ее поверхности появляется четкая песчаная фигура, показывающая расположение узловых линий. По картине расположения узловых линий можно судить о характере распределения вибрационных напряжений в объекте при данной форме колебаний.

Для получения более полной и достоверной информации о распределении амплитуд и форм колебаний объектов, а также вибрационных напряжениях (без ограничения к профилю поверхности) необходимо проводить специальный эксперимент, при котором на исследуемую поверхность наклеиваются тензометрические датчики, реализующие тензорезистивный эффект [1]. Однако это контактный метод. Его применение затруднительно для поверхностей большой протяженности.

Дальнейшее совершенствование техники исследования формы собственных колебаний объектов связано с изобретением (в 60-е годы) лазера и последующим бурным развитием экспериментальной когерентной оптики.

В этот период широкое распространение получили различные варианты голографических методов вибрационного контроля объектов: с усреднением во времени, в реальном времени, стробоскопический, с использованием пары сверхкоротких гигантских импульсов [2]. В результате интерференции нескольких волновых фронтов, возникающих при освещении голограммы опорным пучком (т.е. пучком, который использовался на этапе регистрации голограммы), на фоне нескольких пространственно совмещённых мнимых изображений объекта возникает система интерференционных полос, которые могут быть использованы для вычисления деформации объекта или формы его собственных колебаний.

Например, в голографическом методе реального времени исследуется интерференция световых потоков от самого деформируемого объекта и его мнимого голографического изображения в исходном, недеформированном состоянии.

При использовании двухимпульсной голографии исследуется результат интерференции от двух мнимых изображений объекта в его различных состояниях.

В методе усреднения во времени используется результат когерентного сложения бесконечно большого числа изображений колеблющегося объекта в двух его крайних положениях.

Все упомянутые методы предполагают регистрацию интерференционной картины в объёме некоторой регистрирующей среды, имеющей высокую пространственную частоту (голограммы), т.е. предполагают использование регистрирующих сред с высоким пространственным разрешением. В голографии в качестве регистрирующей среды наибольшее распространение получили специально разработанные фотографические эмульсии, разрешающая способность которых составляет тысячи штрихов на миллиметр. Общеизвестно, что чем выше пространственное разрешение фотоэмульсий, тем меньше их светочувствительность, поэтому голографические фотоматериалы, имея высокое пространственное разрешение, по светочувствительности на два-три порядка уступают фотоматериалам общего назначения. Малая чувствительность голографических фотоматериалов и ограниченная мощность излучения распространённых лазеров требуют увеличения времени экспозиции.

В связи с этим голографический способ исследования формы собственных колебаний объектов, основанный на фотографической регистрации интерференционной картины, предъявляет повышенные требования к виброизоляции измерительной установки, жёсткости её элементов и стабильности условий измерения.

Эффективность виброизоляции измерительной установки и увеличение жёсткости её элементов, как правило, достигается увеличением её массы, а обеспечение стабильных условий измерения предполагает использование установки в помещении, удалённом от источников шума, тепловых потоков и вибраций. а это ограничивает её мобильность. Кроме того, относительно продолжительная и сложная ("мокрая") технология обработки фотоматериалов затрудняет автоматизацию процесса измерения.

Итак, главной причиной, порождающей отмеченные недостатки при использовании голографических методов контроля объектов, является необходимость регистрации мелкоструктурного интерференционного поля: именно по этой причине возникает необходимость использования фотографических материалов с неудобной технологией их обработки и массивной (а, стало быть, стационарной, немобильной) измерительной установкой.

Метрологические характеристики установки в целом определяются видностью, или контрастом интерференционных полос. Как показано в [2,3], система интерференционных полос, возникающих при деформации поверхности объекта, не локализована на ней. Иными словами, поверхность локализации интерференционной картины, т.е. поверхность, на которой контраст интерференционной картины максимален, в общем случае не совпадает с поверхностью объекта. Для увеличения контраста интерференционной картины необходимо, по возможности, приблизить поверхность локализации интерференционных полос к поверхности объекта. Это достигается соответствующим выбором конфигурации оптической схемы, в частности, использованием так называемой голографии сфокусированного изображения. В этом случае в качестве предмета используется не сам объект, а его действительное изображение, формируемое одиночной линзой или объективом, а фотографическая пластинка устанавливается в средней по глубине изображения плоскости. Восстановленное мнимое (и действительное) изображение объекта, естественно, располагается в окрестности фотопластины. причём интерференционные полосы локализованы в непосредственной близости от неё.

Схема голографирования сфокусированного изображения удобна ещё и тем, что, в отличие от голографической схемы общего вида, положение интерференционных полос относительно изображения объекта не изменяется при изменении направления наблюдения, что упрощает процесс обработки экспериментальной информации.

Для голографии сфокусированного изображения применительно к её использованию для контроля формы объектов, с учётом её объективных достоинств даже закрепилось специальное название: спекл-интерферометрия, хотя, принципиально, спекл-интерферометрия ничем не отличается от классической лазерной интерферометрии.

Это название происходит от английского слова *speck* – “пятнышко” и отражает тот факт, что на поверхности изображения оптически шероховатого объекта, освещённого когерентным лазерным светом, формируется грубая пятнистая структура, так называемая спекл-структура.

В области, занятой отдельным пятном спекл-структуры, волновой фронт практически плоский, поэтому при наличии плоского опорного сигнала в световом пятне формируется линейчатая структура с пространственным периодом, который определяется локальным углом встречи предметного и опорного пучков, и на фотопластинке в области каждого пятна формируется дифракционная решётка, т.е. элементарная голограмма. Прекрасная иллюстрация этого утверждения приведена в [4], в разделе, посвящённом спекл-фотографии с двойной апертурой. Если точка объекта, которая соответствует данному пятну, сместится в направлении распространения предметного сигнала на некоторое расстояние, линейчатая дифракционная картина в плоскости пятна переместится на некоторую долю своего периода. Если объект колеблется, то дифракционная картина в плоскости пятна также колеблется, причём амплитуда поперечных (в плоскости пятна) колебаний дифракционной картины однозначно определяется амплитудой нормальной составляющей колебаний соответствующей точки на поверхности объекта. Видность неподвижных дифракционных полос в пятнах спекл-структуры, соответствующих неподвижным, например, закреплённым участкам поверхности объекта, будет максимальна.

Видность колеблющихся полос, являющаяся функцией координат в плоскости регистрации, зависит от амплитуды их колебаний и может быть выражена через функции Бесселя, в аргумент которых входит амплитуда колебаний точки объекта.

После экспонирования, в процессе обработки фотопластинки происходит модуляция показателя преломления или коэффициента пропускания регистрирующего материала. Глубина модуляции зависит от видности интерференционной картины во время экспозиции, от свойств и режима обработки фотоматериала. Фотопластинка после экспонирования и обработки будет представлять собой множество элементарных голограмм, дифракционная эффективность которых повторяет пространственную зависимость видности дифракционных полос на этапе экспонирования. Если теперь осветить такую многофрагментную голограмму опорным пучком, т.е. восстановить изображение объекта, то на фоне множества статистически равномерно распределённых пятен спекл-структуры будет просматриваться система полос.

Пятна, в пределах которых эффективность дифракционной решётки выше, будут выглядеть ярче. В совокупности эти пятна образуют светлую полосу. Пятна, в которых локальная дифракционная картина во время экспозиции колебалась с большей амплитудой, будут засвечены практически равномерно, т.е. в них дифракционная решётка не образуется и при восстановлении выглядеть они будут тёмными. Совокупность таких тёмных пятен образует тёмную полосу.

Внешне образовавшаяся система полос напоминает интерферограмму, т.е. результат наложения двух комплексных функций, соответствующих крайним (амплитудным) состояниям поверхности колеблющегося объекта. Тот факт, что полученная при восстановлении такой фрагментарной голограммы система полос напоминает интерферограмму, создаёт лишь иллюзию интерференции двух спекл-структур.

На самом же деле каждая из этих полос представляет собой линию равного нормального перемещения точек поверхности объекта, а вся система полос в совокупности является топографической картой (топограммой) формы собственных колебаний. Т.е. природа возникновения линий равного уровня и интерференционных полос различна: интерференцион-

ные полосы образуются в результате векторного сложения комплексных амплитуд предметного и опорного сигналов, а линии равного уровня обусловлены усреднением во времени скалярной гармонической функции с периодически изменяющимся аргументом.

Формально это различие проявляется в том, что интерференционные полосы (тёмные) определяются нулями косинуса, а линии равного уровня (светлые) – нулями функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Видность интерференционных полос теоретически не зависит от её порядкового номера, видность же линий равного уровня с ростом номера уменьшается.

Интерференционные полосы можно представить как следы пересечения исследуемой поверхности с множеством эквидистантных, а в случае линий равного уровня – неэквидистантных смещений поверхности сравнения. Это различие обусловлено различным расположением на числовой оси нулей косинуса и функции Бесселя и должно быть учтено при количественной интерпретации экспериментальных результатов.

В дальнейшем семейство полос будем именовать голограммой, а полосу – линией равного уровня.

Отмеченное выше заблуждение относительно природы появления системы полос не столь безобидно, как это может показаться на первый взгляд: корректность определения информативного сигнала (в данном случае – системы полос) влияет на формулировку требований, предъявляемых к установке, и в конечном итоге на её метрологические и эксплуатационные характеристики.

Например, если исходить из голографических представлений о том, что спекл - фотография, полученная в присутствии опорного сигнала, представляет собой множество элементарных голограмм (дифракционных решёток с апертурой, равной размеру пятна), то видность системы полос, в данном случае – интерферограммы, будет определяться:

- видностью полос локальной интерференционной картины на этапе экспонирования;
- глубиной амплитудной или фазовой модуляции соответствующих параметров регистрирующей среды на этапе её химической обработки;
- локальной дифракционной эффективностью элементарной голограммы на этапе восстановления;
- локальной яркостью восстановленного изображения на этапе визуализации или документирования. В таком случае, согласно [4], экспериментальная установка должна иметь входную диафрагму малого диаметра (чтобы увеличить размер пятен спекл - структуры) и эффективную виброизоляцию, а средства регистрации должны иметь высокое (голографическое) пространственное разрешение.

К тому же при практическом использовании голографии (конкретно, голографии сфокусированного изображения) возникают некоторые технические противоречия, которые частично нейтрализуют присущие ей преимущества, например, объективно существующая грубая спекл - структура как носитель оптического сигнала должна быть записана в достаточно мелких (но не несущих полезной информации) подробностях, однако она резко ухудшает качество изображения, маскирует полосы и ограничивает доступную контрольную амплитуду колебаний.

Дифракционная эффективность и пространственное разрешение по мнимому изображению объекта (при восстановлении) всей совокупности элементарных голограмм определяется их средним размером, поэтому с целью увеличения среднего диаметра пятен желательно уменьшить световой диаметр линзы. Однако при этом уменьшается общий световой поток, что, учитывая малую светочувствительность голографических фотоматериалов, крайне нежелательно, т.к. при этом требуется лазер большей мощности или сознательное ограничение габаритов объектов, доступных контролю.

Таким образом, жёсткие требования, которым должна удовлетворять экспериментальная установка, если её рассматривать как разновидность голографического интерферо-

метра (в том числе применительно к вибрационному контролю объектов), не позволяют обеспечить её мобильность и возможность контроля объектов непосредственно в условиях их эксплуатации, а также автоматическую обработку экспериментальной информации. т.к. предполагают большую массу установки. специальные требования к помещению и условиям измерения и ориентированы на фотографическую регистрацию интерференционной картины. (Под интерференционной картиной здесь понимается не низкочастотная система полос, а именно высокочастотная интерференционная картина, обусловленная интерференцией предметного и опорного сигналов в пределах каждого из световых пятен спекл - структуры).

Недостатки голографических методов вибрационного контроля частично устранили в так называемом методе электронной спекл - интерферометрии.

Сущность электронной спекл - интерферометрии заключается в следующем:

- во-первых, регистрируется не высокочастотная (в пространственном смысле) интерференционная картина, а относительно низкочастотная спекл - структура, характерная для изображения оптически шероховатого объекта при освещении его когерентным лазерным излучением;

- во-вторых, оптический сигнал, каковым фактически является спекл - структура, с помощью фотоэлектрических (например, полупроводниковая матрица) или фотоэлектронных (например, видикон) фотопреобразователей, являющихся основой современных теле-, видео- и фотокамер, преобразуется в электрический сигнал, который запоминается, т.е., фактически, – регистрируется в памяти электронно-вычислительной машины;

- в третьих, обработка экспериментальных данных, визуальное и документальное представление результатов вибрационного контроля объекта осуществляется современными средствами вычислительной техники.

Технические характеристики современных теле-, видео. фотокамер и персональных ЭВМ в части быстродействия, объёма и скорости обработки информации, а применительно к регистрации спекл - структуры – и по разрешающей способности, вполне соответствуют требованиям практической виброметрии реальных объектов.

Рассматриваемый метод панорамной виброметрии практически реализован в так называемом электронном спекл - интерферометре [5], который уже продолжительное время и весьма эффективно используется для вибрационного контроля деталей авиационных двигателей в лабораторных условиях.

Электронный спекл-интерферометр представляет собой совокупность лазерного источника излучения, оптического интерферометра, телевизионной камеры, персональной ЭВМ, блока ввода изображения и соответствующего программного обеспечения.

Специфической особенностью упомянутого интерферометра является наличие в его опорном плече управляемого фазовращателя, с помощью которого можно принудительно изменять фазу опорного сигнала на половину периода, а программное обеспечение позволяет вычислять модуль разности двух последующих изображений. Вычитание изображений, одно из которых получено при сдвиге опорного сигнала по фазе на половину периода, позволяет, исключая среднее значение яркости, увеличить видимость интерферограммы.

В идейной основе упомянутого электронного спекл-интерферометра лежат голографические представления, в частности, представления голографии сфокусированного изображения.

Здесь так же, как в голографии сфокусированного изображения:

- используется изображающая система (одиночная линза или сложный объектив);

- в плоскости регистрации, которая совмещается с действительным изображением объекта, формируется опорный сигнал;

- регистрируется распределение освещённости по изображению;

– результат регистрации интерпретируется в представлении об интерференции изображения шероховатой поверхности колеблющегося объекта с гладким волновым фронтом опорного сигнала.

К настоящему времени установился подход к рассматриваемому интерферометру как к разновидности голографической установки, отличающейся только тем, что регистрация информации осуществляется не фотографической пластинкой, а телекамерой. Поэтому в конструкции интерферометра просматриваются некоторые элементы голографической установки.

Например, для успешной регистрации спекл-интерферограммы разность фаз между предметным и опорным сигналами в течение экспозиции должна сохраняться постоянной. Исходя из голографических представлений, измерительная установка должна быть эффективно виброизолирована, её элементы должны обладать достаточной жёсткостью, объект (независимо от его фактических габаритов и массы) должен быть установлен на общем с элементами оптической схемы основании, а тепловые конвекционные потоки – отсутствовать.

Желательное с голографических позиций увеличение среднего размера пятен спекл-структуры (с целью достижения большего разрешения по мнимому изображению и дифракционной эффективности) достигается уменьшением диаметра входного зрачка объектива. Поэтому в конструкции рассматриваемого интерферометра предусмотрена входная диафрагма малого диаметра.

Для регистрации голограммы опорный пучок должен иметь гладкий волновой фронт по возможности, меньшей кривизны и направляться в плоскость регистрации под меньшим углом к оптической оси схемы с целью уменьшения подлежащих регистрации пространственных частот.

Таким образом, рассматриваемому электронному спекл-интерферометру присущи следующие объективные недостатки:

- конструктивной основой интерферометра является массивная виброизолированная платформа, практически недоступная для транспортировки;
- объект должен быть установлен на общем с элементами оптической схемы основании, что ограничивает габариты и массу объектов, доступных вибрационному контролю;
- входная диафрагма малого светового диаметра уменьшает абсолютную величину видеосигнала (т.е. количество разрешаемых по входу градаций яркости) и отношение сигнал/шум приёмного тракта, что требует или увеличения мощности используемого лазера, или сгущения габаритов подлежащих контролю объектов;
- регистрируется непосредственно грубая спекл-структура, которая маскирует полезную информацию и ухудшает качество представления выходной информации;
- необходимость управления фазой (сдвиг на половину периода) опорного сигнала при записи двух последовательных кадров затрудняет автоматизацию процесса ввода экспериментальной информации.

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров, -М.: Сов. энциклопедия, 1984-944с.
2. Островский Ю.М., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия.-М: Наука,1977. 339с.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М., Мир, 1982.-504с.
5. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл - интерферограмм вибрирующих объектов// Известия Самарского научного центра РАН. №1. 1999. С.134-136.