

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОМОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Меженин А.В.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Цифровые спекл-интерферометры (ЦСИ) являются надежным инструментом исследования вибраций ответственных деталей различных конструкций. Они нашли широкое применение в процессе поузловой доводки авиационных двигателей, в частности, при исследовании динамических характеристик лопаток компрессора и турбины [1]. Разработанный в СГАУ программный метод статистической обработки спеклограмм [2] обеспечил повышение стабильности оптико-электронной схемы интерферометра с непрерывным лазером к случайным динамическим нагрузкам. Это позволило создать помехоустойчивый ЦСИ [3] для исследования вибрационных характеристик сложных колебательных систем, для которых пока затруднена разработка численных моделей. К таким задачам относится исследование многомодовых колебаний, когда, например, объект возбуждается независимыми вибраторами в пространственно разнесенных точках. Для повышения надежности исследований рассмотрение данной задачи будем производить, опираясь на результаты, полученные ранее с помощью методов голографической интерферометрии [4].

Известно, что как голографическая, так и спекл-интерферометрия позволяют исследовать смещения поверхности объекта под действием приложенной к нему нагрузки. Интерференционная картина, образующаяся в результате регистрации изображения движущейся поверхности, в обоих методах связана с величиной смещения точек поверхности за время регистрации. Однако, процесс формирования интерференционных картин в этих методах существенно различается [5].

В [4] показано, что интенсивность восстановленного изображения объекта, голографическая регистрация которого осуществлялась в процессе воздействия на него нагружающего усилия, зависит не только от величины смещения поверхности под действием приложенной нагрузки, но и от характера движения поверхности. Распределение интенсивности $I(x, y)$ в восстановленном из голограммы изображении описывается характеристической функцией M_i интерферограммы:

$$I(x, y) = I_0(x, y)M_i^2, \quad (1)$$

где $I_0(x, y)$ – интенсивность восстановленного изображения объекта в стационарном состоянии.

Конкретный вид характеристической функции может быть рассчитан, если известна функция движения поверхности. Пусть объект под

действием приложенной нагрузки совершает гармонические колебания, т. е. функция движения его поверхности $F(t) = A(x, y) \cos(\omega t + \theta)$, где A , ω и θ - амплитуда, частота и фаза колебаний, соответственно, то характеристическая функция имеет достаточно простой вид

$$M_t = J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right), \quad (2)$$

где J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка, λ - длина волны света в интерферометре. Соответственно, интерференционная картина, наблюдаемая при восстановлении голограммы, описывается выражением

$$I(x, y) = I_0(x, y) J_0^2\left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y)\right] \quad (3)$$

Интерференционные картины, описываемые функцией вида (3), позволяют легко установить связь между распределением интенсивности в изображении и амплитудой колебаний в наблюдаемой точке поверхности. Однако, если движение поверхности носит более сложный характер, то усложняется вид характеристической функции интерферограммы, а следовательно и интерпретация зарегистрированной интерференционной картины. В работе [6] было показано, что интерферограммы вибрирующей одновременно на нескольких резонансных частотах пластины представляют собой комбинацию классических типов форм колебаний (мод).

Например, если пластина одновременно вибрирует на двух резонансных частотах ω_1 и ω_2 , а функция $F(t)$ имеет вид

$$F(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2), \quad (4)$$

где A_1 и A_2 , θ_1 и θ_2 - амплитуда и фаза колебаний в точке (x, y) пластины на соответствующих частотах, то характеристическая функция интерферограммы представляется в виде [6]

$$M_t = J_0\left(\frac{4\pi A_1}{\lambda}\right) J_0\left(\frac{4\pi A_2}{\lambda}\right) \quad (5)$$

Поскольку функция M_t является произведением двух функций, зависящих только от амплитуд колебаний точек поверхности, то темные полосы на изображении, соответствующие нулям функций Бесселя, появляются во всех тех местах, где они появились бы в результате колебаний на каждой резонансной частоте отдельно. Поэтому темные полосы будут непрерывными, в то время как светлые полосы будут распадаться на отдельные малые области. При расчете амплитуд колебаний порядковый номер интерференционной полосы в каждой точке поверхности объекта необходимо определять отдельно для каждой из функций Бесселя в выражении (5). При этом светлые полосы одной из функций являются фоном, на котором по числу пересечений их темными полосами, представляется возможным установить порядковый номер интерференционной

полосы, принадлежащей другой функции.

В электронной спекл-интерферометрии с помощью телекамеры на экран монитора выводится спекл-изображение смещающейся поверхности объекта, сложенное с когерентным опорным полем [5]. Распределение интенсивности I_T на светочувствительной поверхности телевизионной камеры, усредненное по времени T формирования кадра изображения, имеет вид:

$$I_T(x, y) = I_o(x, y) + I_s(x, y) + \frac{2}{T} \sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} \int_0^T \cos[\Delta\varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda} F(t)] dt, \quad (6)$$

где $\Delta\varphi_s$ – разность фаз спекла и опорного пучка в рассматриваемой точке изображения объекта в стационарном состоянии; I_o и I_s – интенсивности опорного и предметного пучков. Яркость изображения, наблюдаемого на экране монитора, будет пропорциональна интенсивности I_T и связана, таким образом, с функцией движения объекта.

В случае простых гармонических колебаний поверхности, когда $F(t) = A(x, y) \cos(\omega t + \theta)$, из (6) следует, что яркость $B(x, y)$ изображения на мониторе может быть представлена в виде

$$B(x, y) = k \{ I_o(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right] \cos \Delta\varphi_s \}, \quad (7)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров системы ввода изображений.

Обычно в ЦСИ для повышения контраста интерференционной картины, описываемой выражением (7), программным методом устраняют постоянную составляющую яркости, обусловленную суммой интенсивностей ($I_o + I_s$) опорного и объектного пучков. Например в [1], в компьютер последовательно вводятся два кадра изображений вида (7), различающихся смещенной на 180° фазой опорного пучка. Модуль вычитания этих изображений позволяет получить контрастные интерференционные полосы, яркость которых записывается, как

$$B(x, y) = 4k \left\{ \sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right] \cos \Delta\varphi \right\}. \quad (8)$$

В соответствии с (8) картина полос резонансно колеблющейся поверхности, зарегистрированная ЦСИ на спеклограмме, описывается модулем функции Бесселя первого рода нулевого порядка. Интерференционная картина подобных колебаний, полученная методом голографической интерферометрии, в соответствии с (3) определяется квадратом той же самой функции Бесселя. Поскольку максимумы и ми-

нимумы обеих функций совпадают, то амплитуды колебаний точек поверхности, принадлежащих в обеих интерференционных картинах центрам интерференционных полос, также должны совпадать.

Можно показать, что если объект одновременно колеблется на двух резонансных частотах, т.е. функция $F(t)$ движения его поверхности представлена в виде (4), то распределение полос на спеклограмме будет описываться модулем произведения функций Бесселя, аргументами которых являются амплитуды колебаний каждой из частот.

Таким образом, для одного и того же типа смещения поверхности, сколь угодно сложным оно бы не было, интерференционные полосы, полученные методами цифровой и электронной спекл-интерферометрии, можно интерпретировать одинаковым образом с полосами, полученными методом голографической интерферометрии. Это позволяет в полной мере использовать развитые методы анализа голографических интерферограмм вибрирующих объектов для анализа спеклограмм.

Для обоснования выводов теоретического анализа в настоящей работе рассмотрены результаты исследования с помощью ЦСИ колебаний металлической пластины, возбуждаемой одновременно в двух пространственно разнесенных точках независимыми возбудителями.

Плоская пластина зажималась в тисках, которые жестко закреплялись на оптическом столе интерферометра. Колебания пластины возбуждались с помощью двух пьезокерамических вибраторов, питаемых от звуковых генераторов. Точки контакта вибраторов с пластиной устанавливались вблизи области крепления пластины (рис.1).

Первоначально последовательно возбуждались колебания пластины первым вибратором на резонансной частоте $f_1=760$ Гц и вторым вибратором на резонансной частоте $f_2=1250$ Гц. Спеклограммы полученных форм собственных колебаний пластины показаны на рис.2.

Далее объект возбуждался на этих же двух резонансных частотах одновременно. Спеклограммы колебаний пластины, возбуждаемой на двух частотах одновременно, регистрировались при различных отношениях возбуждающих усилий, прикладываемых вибраторами. Уровень возбуждения варьировался напряжением U питания, подаваемого на вибраторы от звуковых генераторов. Зарегистрированные спеклограммы приведены на рис. 3.

Из анализа спеклограмм, приведенных на рис. 3, следует, что характер изменения яркости полос в полученных картинах, соответствует видоизменению интерференционных полос, полученных методом голографической интерферометрии в [6]. Картина полос, образованная колебаниями пластины на одной из резонансных частот, модулируется интерференционными полосами, образованными из-за колебаний на другой

резонансной частоте. Изменение уровня возбуждения на одной из резонансных частот, приводит к изменению уровня амплитуд колебаний по всей поверхности пластины, но при этом характерный вид интерференционной картины не изменяется. Темные полосы, принадлежащие каждой форме колебаний, являются непрерывными, а светлые полосы образованы с учетом наложения на них полос другой формы колебаний.

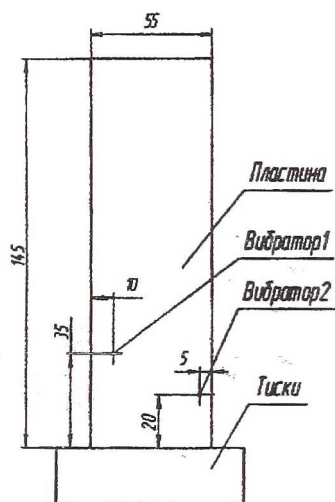


Рис. 1. Схема расположения точек контакта вибраторов

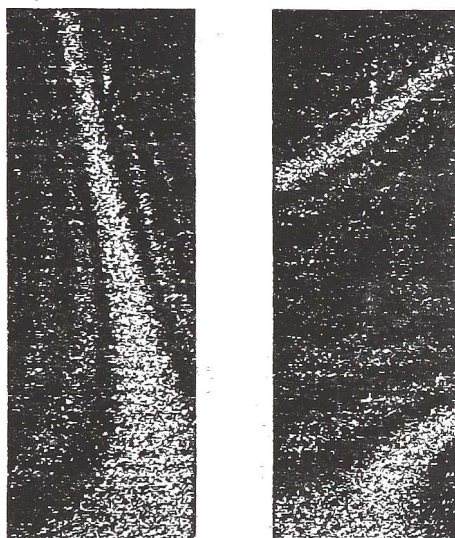


Рис. 2. Спеклограммы колебаний пластины при $f_1=760$ Гц и $f_2=1250$ Гц

Подобные результаты были получены при возбуждении пластины одновременно на других парах собственных частот, например, 840 и 1000 Гц.

Следующим этапом исследования был эксперимент по определению уровня устойчивости резонансных форм колебаний объектов. Для этого с помощью вибратора 1 возбуждались колебания пластины на резонансной частоте $f_1=840$ Гц, а на второй возбудитель со звукового генератора подавалась частота $f_2=600$ Гц. Предварительно было установлено, что частота $f_2=600$ Гц не являлась резонансной. В процессе эксперимента уровень сигнала на частоте f_1 не изменялся, а уровень возбуждения на частоте варьировался в широких пределах ($U_2/U_1 \leq 10$). Было показано, что резонансные формы колебаний могут характеризоваться значительной устойчивостью к дестабилизирующим вынужденным колебаниям.

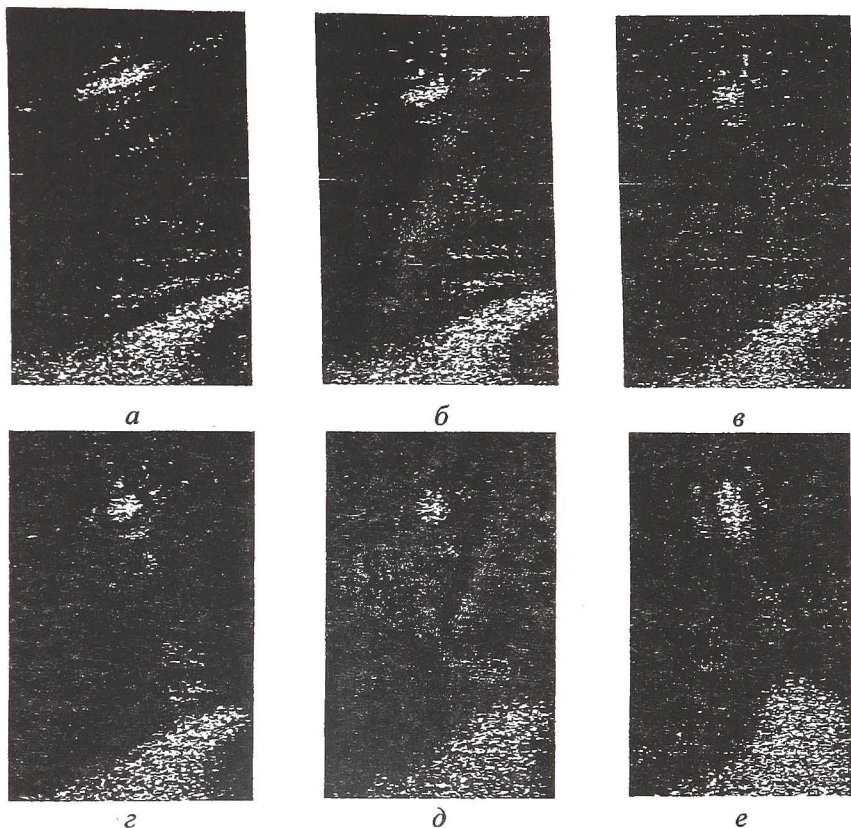


Рис. 3. Видоизменения форм колебаний пластины, возбуждаемой на частотах $f_1=760$ Гц и $f_2=1250$ Гц одновременно, при изменении соотношения уровней сигналов U_1/U_2 на вибраторе 1 (а, б, в) и на вибраторе 2 (г, д, е) равном 0,75 (а); 1,25 (б); 1,5 (в); 2 (г); 3 (д); 6 (а); (е)

Исследовались также формы колебаний при возбуждении пластины на одной резонансной частоте двумя вибраторами одновременно. В этом случае на экране монитора могла наблюдаться динамическая спеклкартина в виде бегущей на поверхности исследуемого объекта узловой полосы. Динамические спеклограммы наблюдались на частотах 840 Гц и 1250 Гц. Наличие бегущих волн колебаний можно связать с тем, что фазы синусоидальных сигналов возбуждения, приходящих на вибраторы от двух звуковых генераторов являются не синхронизированными. Это подтверждает эксперимент с возбуждением колебаний пластины на одной резонансной частоте двумя вибраторами, питаемыми от одного звукового генератора. Здесь регистрировалась стационарная спеклограмма, соответствующая форме колебаний пластины на данной резонансной частоте.

Выводы:

Цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером позволяет методом усреднения во времени регистрировать колебания объектов, возбуждаемых одновременно на двух и более резонансных частотах. Характерная структура полос в спеклограммах соответствует закономерностям изменений в интерференционных картинах, получаемых при голографической регистрации поверхности, колеблющейся на двух некратных собственных частотах.

Показано, что при одновременном возбуждении колебаний объекта на резонансной и вынужденной частотах, форма собственных колебаний обладает запасом устойчивости.

При возбуждении колебаний объекта на одной резонансной частоте в двух пространственно разнесенных точках независимыми возбудителями на поверхности объекта наблюдается бегущая волна колебаний. Контрастность полос возрастает с обеспечением равенства амплитуд колебаний возбудителей и идентичности распределения полос в исходных спеклограммах. Скорость перемещения полос, по-видимому, определяется разностью фаз сигналов, поступающих от независимых звуковых генераторов. При включении двух возбудителей от одного из звуковых генераторов получаемая спеклограмма представляла стационарную картину полос.

Список литературы

- Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов//Известия Самарского научного центра РАН, 1999, №1, – С. 134-136.
- Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д. Электронный спекл-интерферометр для вневстендовой виброакустической диагностики энергетических установок// РК техника. Серия XII, вып. 1, 2000. – С. 200-208.
- Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д. Помехоустойчивый интерферометр для автоматизированной вибродиагностики объектов//Сб. докл. междунар. Научно-техн. Конф., посвященной памяти академика Н.Д. Кузнецова. Самара, СГАУ. 2001. – С. 159-164.
- Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. –504с.
- Джоунс Р, Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
- Molin N.E., Stetson K.A. Measuring combination mode vibration patterns by hologram interferometry// J.Phis.E:Sci. Instr.,2, 609 (1969)