УДК 535.417+53.082.54

ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ВИБРОМЕТРИИ

М. Е. Гусев ¹*, И. В. Алексеенко ²

¹ ООО «Алгоритм-Опто»; ² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Проанализированы основные принципы и особенности цифровой регистрации и реконструкции голографических изображений и интерферограмм. Показаны преимущества и недостатки цифровых интерферограмм по сравнению с классическими аналоговыми интерферограммами. Указаны основные требования к параметрам программно-аппаратных средств цифровой голографической интерферометрии. Приведены примеры практического применения цифровой голографической интерферометрии для анализа различного вида вибраций как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Описан ряд новых высокоэффективных методов виброизмерений и анализа многокомпонентных независимых и связанных колебаний и ударных вибровозбуждений, приведены примеры конкретной реализации с представлением результатов в виде компьютерной динамической визуализации-анимации (трёхмерное представление во времени). Предложены перспективные методики виброизмерений, связанных с программируемой многокадровой регистрацией и с последующим многофункциональным анализом зарегистрированного массива данных с анимацией результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционными методами голографической интерферометрии, применяемыми в исследованиях вибраций, являются метод усреднения по времени, метод реального времени, стробоголографические методы, включая двухимпульсные, методы голографии с временной модуляцией [1–3].

Все эти методы успешно используются в цифровой голографии [4]. Однако цифровая голография не сводится к простой замене фоточувствительного материала на цифровую камеру при регистрации и к замене процесса фиксации голограммы и последующего её лазерного восстановления компьютерной обработкой массивов данных и построением поверхности разности фаз. Целью данной работы является анализ последних достижений голографической виброметрии и их последовательная систематизация для адаптации в научно-техническое приборостроение и создания контрольно-измерительных систем нового поколения.

1. СТРОБОГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ

Голографические методы исследования вибраций в той или иной степени используют элементы стробирования, т. е. регистрации отдельной цифровой голограммы за время $t_p \ll T$, где T — период колебаний [5]. Это позволяет «заморозить» движение поверхности объекта в определённых фазах колебаний φ_1 и φ_2 , что сводит анализ вибраций к методу двух экспозиций. При недостатке энергии для регистрации цифровой голограммы в одной экспозиции с длительностью t_p создаётся серия из N импульсов, по одному на период, а энергия излучения при этом накапливается на матричном цифровом детекторе. Регистрируются N экспозиций с длительностью t_p в одной фазе φ_1 при открытой камере, суммарная экспозиция $T_{3ксп} = Nt_p$ (время, на которое открыта камера $T_{cam} \gg T$). Затем процесс повторяется в фазе φ_2 . Такой подход является цифровым аналогом классического стробоголографического метода.

^{*} miegus@mail.ru



Рис. 1. Пример многоимпульсной регистрации с шестью стробирующими импульсами на один период колебаний



Рис. 2. Выделение гармоники. С помощью стробирующих импульсов (моменты стробирования указаны под осью абсцисс) можно регистрировать колебания в двух фазах на частоте гармоники (здесь $A_{\rm s}$ — амплитуда сигнала)

Развитием стробоголографических методик стало применение многоимпульсного стробирования, а также компенсационных методов исследования многокомпонентных колебаний [6]; см. рис. 1 и 2.

При регистрации вибрирующего объекта в фазах φ_1 и φ_2 мы не получаем полную картину перемещений поверхности объекта $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ (здесь \mathbf{A} — вектор перемещений поверхности, \mathbf{r} — радиусвектор с началом координат в месте расположения источника), что, собственно, и является целью измерений. Однако данная картина может быть рассчитана согласно следующему выражению [5]:

$$\cos^2[\mathbf{KA}\left(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2\right)/2] = 1,\tag{1}$$

где **К** — вектор голографической чувствительности. Это свойство определяет важнейшее преимущество стробоголографии — регистрацию полей перемещений с пониженной чувствительностью.

Ненулевая длительность стробирующих импульсов требует соблюдать в процессе измерений определённые соотношения между амплитудой колебаний, длительностью (скважностью Q) и фазой ($\varphi_0 = \varphi_1 = -\varphi_2$) стробирующих импульсов [7]:

$$\frac{\mathbf{KA}\cos\varphi_0}{Q} < 1 \tag{2}$$

при $\varphi_0 \neq \pi/2$. Здесь скважность стробирующих импульсов $Q = T/t_p$, $t_p - длительность импульса стробирования. Несоблюдение данного соотношения приводит к появлению на интерферограмме паразитных полос и исключает возможность проведения измерений (см. рис. 3).$

В работе [8] описана управляемая с помощью программ регистрация серии голограмм вибрирующего объекта с использованием скоростной камеры, позволяющая получать и представлять результаты в виде динамической визуализации (анимации) изменения поверхности перемещений. Применение метода прямого вычисления фазы (temporal unwrapping technique) и управляемой регистрации с использованием стандартной камеры технического зрения (с частотой 15 кадров



Рис. 3. Влияние скважности импульсов Q на нормированную интенсивность vинтерференционной картинки и появление паразитных полос: $a-Q=100,\, \delta-Q=10$

N⁰	Название метода	Описание
1	метод двух экспозиций	сравнение двух изображений в фазах φ_1 и $\varphi_2, t_{ m p} \ll T$
2	метод реального времени	сравнение во времени изображений с изменяемыми
		параметрами $\varphi,\omega,\mathbf{A}$ и фиксированного начального
		изображения при $\varphi = \mathrm{const}$
3	метод усреднения	регистрация изображения с экспозицией $T_{ m scc}\gg T$
	по времени	
4	многоэкпозиционая	регистрация N изображений и последующее
	регистрация и анимация	представление поверхностей разностей фаз $\Delta arphi_{k1}$
		в виде фильма, $\Delta arphi_{k1} = arphi_k - arphi_1, k=2, \ldots , N$
5	метод фазового накопления	регистрация N изображений и последующее
		вычисление $\Delta \varphi_N = \Delta \varphi_{21} + \Delta \varphi_{32} + \ldots + \Delta \varphi_{N,N-1}$
6	метод прямого расчёта	регистрация N изображений и последующее
	фазы	представление в виде фильма без вычисления
		промежуточных интерферограмм
7	метод двух экспозиций	$T_{ m экc} \gg T$, регистрация N импульсов в фазах φ_1
	с накоплением	и $arphi_2,t_{ m p}\ll T$
8	многоэкпозиционая	регистрация M экспозиций по N импульсов в фазах
	регистрация и анимация	$\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_M$ при $t_\mathrm{p} \ll T$ и последующее представление
	с накоплением	разностей фаз $\Delta arphi_{21}, \ldots, \Delta arphi_{M1}$ в виде фильма

в секунду) и фиксированного пропуска периодов колебаний описано в работе [9]. Методика разделения связанных гармонических колебаний с применением стандарной камеры описана в работе [10]. Метод разделения форм несвязанных колебаний малых амплитуд с использованием многокадровой высокоскоростной регистрации и последующей программной обработки изложен в работе [11].

Методы цифровой голографии, успешно применяемые исследователями для анализа вибраций, кратко представлены в табл. 1.

2014



Рис. 4. Система цифрового голографического виброметра: 1 — непрерывный лазер, 2 — модулятор лазерного излучения (МЛИ), 3 — блок управления МЛИ, 4 — голографический интерферометр, 5 — камера технического зрения, 6 — объект, 7 — возбудитель вибрации, 8 — сенсор вибрации, 9 — усилитель для возбудителя, 10 — компьютер, 11 — коннектор-блок

2. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ВИБРОМЕТРА

На рис. 4. представлена структура и состав системы цифрового голографического виброметра с использованием программно-аппаратных средств компании «National Instruments». Использована программно-аппаратная среда «Labview» (версии 8.6 и выше) и модули цифровой электроники на платформе PCI. Система легко адаптируется под другие платформы компании «National Instruments».

Система цифрового голографического виброметра представляет собой автоматизированный цифровой голографический измерительный комплекс нового поколения для проведения виброизмерений, анализа полученных данных и их представления в удобном конечному пользователю виде. Система построена по модульному принципу. В зависимости от решаемых задач, лазер 1 и камера технического зрения 5 могут быть видимого, инфракрасного или ультрафиолетового диапазонов. Камера может быть высокоразрешающей, высокоскоростной или высокочувствительной с различными интерфейсами подключения. При отключении функций виброанализа система может быть использована для измерений статических деформаций без какой-либо перенастройки. В качестве модулятора лазерного излучения могут использоваться как электрооптические, так и акустооптические затворы. Сигналы управления и контроля внешними модулями 7, 8, 9 и др. (по усмотрению потребителя) формируются и отображаются виртуальными приборами системы. Никакие дополнительные внешние приборы или устройства (спектроанализаторы, фильтры, генераторы, осциллографы, измерители и т. д.) не требуются.

Исследования и разработка цифрового голографического виброметра проводились с различными сочетаниями модульных устройств. Экспериментально исследованы возможности лазеров в видимом (мощность лазеров 0,01÷18 Вт) и ультрафиолетовом (мощность 50 мВт) диапазо-

нах, высокоразрешающие и высокоскоростные камеры с различными интерфейсами подключения (Camera Link, USB). Использовались различные сочетания модулей цифровой электроники компании «National Instruments».

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Стационарные процессы

Под стационарными процессами в вибрационных измерениях мы будем понимать все виды процессов, в которых амплитуды и частоты вибраций неизменны во времени. Вибрации могут присутствовать одновременно (комбинации вибраций), иметь различные частоты и амплитуды. Также возможны комбинации разнонаправленных движений: вибрации/вращение или вибрации/движение как целого. Различают два вида процессов: несвязанные вибрации и вибрации на рационально-связанных частотах.

3.1.1. Несвязанные вибрации

Результирующее движение точек поверхности объекта будет определяться как сумма независимых движений. Для анализа таких движений разработан и успешно применяется метод с временной модуляцией (TMH-метод [12]), при котором

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \sum_{k} \mathbf{A}_{k}(\mathbf{r}) \sin(\omega_{k}t + \varphi_{k}).$$
(3)

В ТМН-методах легко выделить колебания на одной из частот, отсекая колебания на других частотах, однако положение и яркость интерференционных полос определяются функциями Бесселя, что препятствует применению современных методов цифровой голографии, основанной на зависимости яркости полос в виде тангенса. В стробоскопической интерферометрии, наоборот, легко компенсировать колебания на одной из частот, получив тангенциальные полосы, соответствующие другой частоте. В экспериментах использовалось возбуждение двух форм резонансных колебаний модельного объекта двумя независимыми источниками:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \mathbf{A}_1(\mathbf{r})\sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \mathbf{A}_2(\mathbf{r})\sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$
(4)

Если стробировать объект с частотой $f_1 = \omega_1/(2\pi)$, то от каждой пары стробирующих импульсов мы получим две голограммы, скомпенсированные на частоте ω_1 , но имеющие разные фазы φ'_2 и φ''_2 на частоте ω_2 .

Предлагаемая методика основана на многоэкспозиционной регистрации с последующей анимацией результатов. Если количество регистрируемых голограмм N, скомпенсированных для частоты ω_1 , достаточно велико, то при анимации мы увидим последовательность нерегулярных интерферограмм для формы колебания на частоте ω_2 . Применяя алгоритм компенсации, можно выделить и анимировать картину колебаний на частоте ω_2 с плавным и регулярным (последовательным) изменением амплитуды. Это обстоятельство является важным аргументом в пользу многокадровой регистрации и последующей программной анимации. Также важно отметить, что при этом успешно регистрируются и визуализируются разнонаправленные движения типа вибрация/вращение и вибрация/движение как целое.

Стационарность параметров вибраций позволяет успешно осуществлять программируемую стробоскопическую регистрацию медленными высокоразрешающими камерами, например камерой «Pulnix TM-1420CL», имеющей скорость регистрации всего 15 кадров в секунду. Для этого

М. Е. Гусев, И. В. Алексеенко

612



Рис. 5. Интерферограммы в пять последовательных моментов времени, иллюстрирующие разделение связанных мод колебаний: компенсация гармоники (выделение сигнала на основной частоте, панель *a*) и компенсация сигнала на основной частоте (выделение гармоники, панель *б*). Размеры по вертикали (300) и по горизонтали (400) соответствуют размерам изображения в пикселах камеры

предусматривается пропуск необходимого количества периодов с жёстким контролем за сохранением требуемого программного изменения или постоянства фазы. Для несвязанных колебаний последовательность стробирующих импульсов имеет вид

$$t_n = t_0 + nMT,$$

где $T = 2\pi/\omega_1, M$ — количество пропускаемых периодов, n — количество голограмм.



Рис. 6. Иллюстрация возможности трёхмерного представления во времени (анимации): визуализация основной моды (a) и гармоники (б). Фрагменты видеофильма представлены для моментов времени, соответствующих интерферограммам на рис. 5. Шкала на горизонтальных осях соответствует размеру изображения в пикселах камеры, шкала на вертикальной оси — отклонению δz объекта от невозмущённой плоскости

3.1.2. Связанные колебания

В работе [10] показана принципиальная возможность разделения вибрационных резонансных форм, вызванных связанными колебаниями. Дальнейшим развитием метода является применение программируемой многокадровой регистрации и последующей программной цифровой обработки, что позволяет раздельно визуализировать (анимировать) связанные резонансные формы. На рис. 5, 6 приведён пример выделения резонансных форм колебания вида

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \mathbf{A}_1(\mathbf{r})\sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \mathbf{A}_3(\mathbf{r})\sin(\omega_3 t + \varphi_3).$$
(5)

Последовательность моментов стробирующих импульсов имеет вид

$$t_n = t_0 + n\left(MT + \Delta t\right),$$

М. Е. Гусев, И. В. Алексеенко

2014

где параметр Δt определяет сдвиг фаз между двумя последовательными экспозициями, необходимый для развёртывания процесса во времени и последующей анимации. Длительность стробирующего импульса $t_s = T_3/Q$, где T_3 — период третьей гармоники, при этом не имеет смысла разбивать период более чем на Q интервалов. Для удобства последующих вычислительных операций число интервалов выбиралось кратным 4. При Q = 80 максимальное количество голограмм было равно 64, чтобы исключить взаимное влияние из-за временно́го перекрытия.

Для удобства отображения результатов в виде анимации желательно регистрировать не менее трёх периодов на основной частоте, т. е. не менее 200 голограмм. Дальнейшее увеличение числа голограмм приведёт к более длительной анимации. Исследуемый объект представлял собой металлический диск с диаметром 20 см и толщиной 2 мм, закреплённый в центре. Вибрация возбуждалась в точке закрепления.

3.2. Нестационарные процессы. Ударное возбуждение

Для исследования колебаний объекта при ударном возбуждении необходимы короткие экспозиции, а следовательно, более мощные лазеры. В экспериментах применялась высокоскоростная камера «Redlake Motion Pro X4» и мощный твёрдотельный непрерывный лазер «Verdi V18» компании «Coherent». Объект представлял собой квадратную пластинку с размерами 10×10 см и толщиной 2 мм, закреплённую по верхней и нижней кромке. Ударный электромагнитный возбудитель располагался последовательно в нескольких различных точках. Регистрация осуществлялась со скоростями от 1 000 до 5 000 кадров в секунду, количество регистрируемых голограмм было от 200 до 1 000, все параметры эксперимента контролировались компьютерной управляющей системой.

Эксперименты показали, что простая высокоскоростная съёмка не позволяет выделить всю необходимую информацию. Требуются серии высокоскоростной многокадровой регистрации с различными параметрами. В частности, необходимо изменять время задержки начала регистрации относительно удара, варьировать скорость регистрации, подбирать скорость регистрации относительно частот (периодов) основных вибрационных мод, одновременно возбуждаемых ударом. Следует отметить, что такого рода процессы достаточно сложны и мало изучены. Можно выделить несколько основных стадий: возбуждение ударной волны; одновременное возбуждение нескольких основных резонансных мод с различным временем затухания; затухающие колебания основной резонансной моды. Каждая из этих стадий требует разработки и применения специальных методик регистрации и обработки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные цифровые голографические методы виброизмерений разнообразны и позволяют изучать практически все виды вибраций. Развитие вычислительной техники стимулирует разработку новых методов и средств виброизмерений, основанных на однократной многокадровой программируемой регистрации и последующей программной обработке для оптимального представления результатов (с визуализацией в удобном пользователю виде и применением компьютерной анимации). Актуальны также и разработки программно-аппаратных автоматизированных голографических виброизмерительных комплексов с единой системой управления, контроля и представления результатов. Важно отметить, что такая система должна быть максимально интегрирована и совместима с другими видами виброизмерительной аппаратуры, что позволит различным виброизмерительным средствам дополнять друг друга и расширять виброизмерительные возможности. Такая голографическая измерительная система с применением

стробоголографического метода создана и применена в представленной работе для исследования многокомпонентных колебаний и ударного возбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Powell R. L., Stetson K. F. // J. Opt. Soc. Amer. 1965. V. 55, No. 8. P. 1 593.
- 2. Vest C. M. Holographic interferometry. Wiley, 1979.
- 3. Erth C. Holographic nonedestructive testing. Academic Press, 1974.
- 4. Digital speckle pattern interferometry and related techniques / Ed. by P. K. Rastogi. Wiley, 2001.
- 5. Archbold E., Ennos A. A. // Nature. 1968. V. 217. P. 942.
- 6. Vikram C.S. // Opt. Comm. 1973. V.7. P. 347.
- 7. Gurevich V.S., Gusev M.E., Alexeenko I.V. // Proc. SPIE. 2002. V.5134. P.22.
- 8. Pedrini G., Osten W., Gusev M. E. // Appl. Opt. 2006. V. 15. P. 3 456.
- 9. Алексеенко И.В., Гусев М.Е. // Автометрия. 2008. Т. 44, № 1. С. 111.
- 10. Alekseenko I., Gusev M., Gurevich V. // Appl. Opt. 2009. V. 48, No. 18. P. 3 475.
- 11. Trillo C., Doval A. F., Mendoza-Santoyo F., et al. // Opt. Express. V. 17, No. 20. P. 18014.
- 12. Aleksoff C. C. // Appl. Opt. 1971. V. 10. P. 1 329.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

A STUDY OF MULTICOMPONENT MECHANICAL OSCILLATIONS BY THE METHOD OF DIGITAL HOLOGRAPHIC VIBROMETRY

M. E. Gusev and I. V. Alekseenko

The basic principles and peculiarities of the digital recording and reconstruction of holographic images and interferograms are analyzed. The digital-interferogram advantages and disadvantages compared with the classical analog interferograms are presented. The main requirements to the firmware parameters of digital holographic interferometry are specified. Examples of practical application of the digital holographic interferometry for analyzing various vibrations in both laboratory and production environment are shown. A number of new high-efficiency methods for performing vibrational measurements and analyzing multicomponent free and coupled oscillations and impact vibrational excitations are described and examples of a particular realization with presentation of the results in the form of computer dynamic animation visualization (three-dimensional representation in time) are given. Perspective methods of vibrational measurements related to the programmable multi-frame recording with subsequent multifunctional analysis of the recorded data array with animation of the results are proposed.