

**ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСКА  
МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ  
СФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

**И. В. Алексеенко, М. Е. Гусев**

*Российский государственный университет им. И. Канта, г. Калининград  
E-mail: ingwarr@mail.ru*

Реализован метод цифровой стробоскопической голографической интерферометрии сфокусированных изображений для измерения перемещений точек поверхности металлического диска, вибрирующего на резонансной частоте. Этот метод измерения перемещений отличается от классической голографической интерферометрии тем, что из процесса измерения исключен процесс получения, регистрации и расшифровки интерферограмм.

**Введение.** Традиционно методы голографической интерферометрии используют фотографические материалы для регистрации голограмм [1–4], что ограничивает их применение при решении многих практических задач. В работе [5] продемонстрирована возможность замены фотографического способа регистрации голограмм способом регистрации с помощью телевизионных систем. Современные цифровые камеры открывают новые возможности как в технике эксперимента, так и в методах обработки оптического сигнала. Предлагается алгоритм измерения вибраций на резонансной частоте металлического диска методом цифровой стробоскопической голографической интерферометрии сфокусированных изображений без регистрации интерферограммы.

Алгоритм включает в себя: регистрацию матрицей цифровой видеокамеры интерференционной картины, возникающей при сложении предметной и опорной волн; перевод оптического сигнала в цифровой код; регистрацию серии голограмм, соответствующих разным состояниям поверхности, в разные моменты времени; предварительную обработку исходных изображений методом двойного прямого преобразования Фурье; фильтрацию в частотной области предметных волн, отвечающих за разные состояния объекта; обратное двойное преобразование Фурье с прямым восстановлением разности фаз между ними, обусловленной перемещениями вибрирующей поверхности; вычисление перемещений, нормальных к поверхности диска.

Целью данной работы является создание и реализация метода, позволяющего проводить измерения периодических колебательных процессов без

построения интерферограмм с использованием алгоритма временного фазового распределения.

**1. Схема эксперимента.** Лабораторный комплекс состоит из следующих основных частей: голографического интерферометра и системы регистрации; исследуемого объекта (металлического диска диаметром 0,2 м и толщиной 1,5 мм); системы возбуждения механических колебаний (генератора, электромагнитного возбудителя, датчика контроля вибраций); компьютера, включающего плату сбора видеоданных и многофункциональные платы ввода/вывода для управления и контроля процессами регистрации и измерения.

Использовалась программно-аппаратная среда LabView-7.1, позволяющая в одной программе автоматизировать процесс регистрации и синхронизировать импульсы стробирования с фазами колебаний объекта, а также проводить процесс обработки и представления результатов измерения.

В работе реализуется схема регистрации голограмм сфокусированного изображения с малым (около  $7-8^\circ$ ) углом между опорным и объектным пучками (рис. 1). Схема включает Nd:YAG-лазер мощностью 50 мВт с длиной волны 532 нм и CCD-камеру (PULNIX TM-1320-15CL) с разрешением  $1300 \times 1030$  пикселей и частотой до 15 кадр./с. Время экспозиции камеры варьировалось от 30 мкс до 70 мс.

Процесс регистрации колебаний на резонансной частоте 374 Гц вследствие низкой частоты работы камеры осуществлялся с пропуском около 30 периодов исследуемого колебания. Наиболее оптимальным было выбрано время экспозиции длительностью 250 мкс по следующим причинам. Во-первых, требовалась наибольшая возможная скважность стробирования [6]. Во-вторых, для мощности лазера, которая использовалась в работе, имеющаяся скважность была максимальной – оптический сигнал можно было зарегистрировать без нарушения условий стробирования.

Система управления и синхронизации позволяла запускать процесс регистрации камерой в строго определенных фазах исследуемого колебания. В течение процесса регистрации вибрации с помощью видеокамеры осуществ-

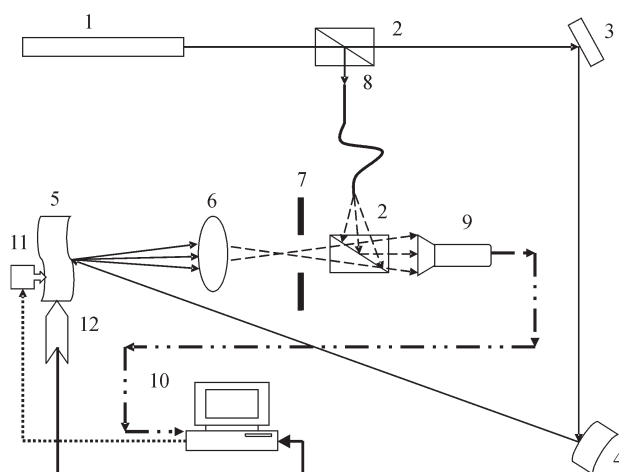


Рис. 1. Схема регистрации: 1 – лазер, 2 – светоделители, 3 – зеркало, 4 – сферическое зеркало, 5 – объект, 6 – линза, 7 – апертура, 8 – опорный пучок, 9 – CCD-камера, 10 – компьютер, 11 – электромагнитный возбудитель, 12 – датчик вибраций

влялась запись 50 голограмм. Регистрация первой голограммы производилась в нулевой фазе колебания. Далее, через 30 периодов, следующий синхроимпульс запускал камеру со сдвигом по фазе около  $7^\circ$  от предыдущего импульса, что соответствует для исследуемого колебания задержке в 117 мкс между импульсами. Таким образом, процесс регистрации осуществляет сканирование периодического процесса.

В качестве формирователя импульсов стробирования применялась специализированная плата-счетчик PCI-6602 компании "National Instruments" (США), максимальная тактовая частота которой около 100 МГц, а точность установки длительности и периода следования импульсов около 0,01 мкс. При установке импульсов стробирования в выбранных фазах и принимаемой допустимой ошибке около 0,1 мкс отношение интервала неточной установки к периоду колебания составляет порядка  $10^{-5}$ , что пренебрежимо мало при регистрации колебания с частотой 374 Гц.

**2. Метод прямого восстановления разности фаз без регистрации интерферограммы.** При исследовании гармонического колебания вида  $A \sin(\omega t)$  методом классической стробоскопической голографической интерферометрии с длительностью стробирующего импульса  $\Delta$  изображение объекта будет промодулировано интерференционными полосами, определяемыми характеристической функцией [5]:

$$|M_T|^2 = \left| \frac{2\Delta}{T} \operatorname{sinc} \left[ \frac{1}{2} \mathbf{KA}(\omega \cos(\omega t_0)) \Delta \right] \cos(\mathbf{KA} \sin(\omega t_0)) \right|^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}$  – вектор чувствительности, равный разности векторов  $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  ( $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  – единичные векторы в направлении освещения и наблюдения объекта соответственно);  $\mathbf{A}$  – вектор перемещения;  $\omega$  – частота колебания;  $T$  – период колебания;  $\omega t_0$  – фаза стробирующего импульса.

Отметим, что интерференционный множитель вида  $\cos(x)$  промодулирован функцией вида  $\sin(x)/x$ . Таким образом, информативные интерференционные полосы искажены этим модулирующим множителем. Уменьшить его влияние на процесс регистрации интерферограмм возможно при использовании бесконечно коротких импульсов стробирования либо потребовать выполнения условий стробирования, для которых значения функции  $\operatorname{sinc}(x)$  будут лежать в интервале, не выходящем за первый минимум этой функции.

Анализ модулирующего множителя  $\operatorname{sinc} \left[ \frac{1}{2} \mathbf{KA}(\omega \cos(\omega t_0)) \Delta \right]$  позволяет получить критерий стробирования с учетом конечной длительности импульса стробирования:

$$\frac{\mathbf{KA} \cos(\omega t_0)}{Q} < 1, \quad (2)$$

где  $Q$  – скважность стробирующего импульса.

Выражение (2) позволяет оценить требуемую скважность и справедливо для случая конечной длительности импульса стробирования как в классической, так и цифровой голографической интерферометрии.

При реализации метода прямого восстановления фазы без регистрации классической голографической интерферограммы матрица цифровой видеокамеры регистрирует интерференционную картину в виде распределения

интенсивности  $I(x, y)$  между предметной волной сфокусированного изображения и опорной волной. Для регистрации голограммы без потери информации необходимо выполнить условие теоремы Найквиста [7]. Для пикселя камеры размером  $\Delta X$  максимальный угол между объектным и опорным пучками определяется выражением  $\alpha_{\max} = \lambda / (2\Delta X)$ . Суммарная зарегистрированная матрицей камеры интенсивность для одной голограммы представляется выражением

$$I(x, y) = [E_R \exp(-i\varphi_R(x; y)) + E_O \exp(-i\varphi_O(x; y))] \times [E_R \exp(-i\varphi_R(x; y)) + E_O \exp(-i\varphi_O(x; y))]^* \quad (3)$$

Если в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  зарегистрированы голограммы, соответствующие различным состояниям объекта, то после регистрации пришедших волн можно рассчитать разность фаз и построить цифровую интерферограмму [8].

С помощью преобразования Фурье разделяют опорную и предметную составляющие зарегистрированного светового поля в фурье-области. В частотной области осуществляют фильтрацию объектной составляющей и применяют к ней обратное двойное преобразование Фурье, а для различных состояний объекта получают функцию разности фаз

$$\Delta\varphi = \arctg[\operatorname{tg}(\varphi_{O1} - \varphi_{O2})] = \arctg\left[\frac{\operatorname{Im}_1 \times \operatorname{Re}_2 - \operatorname{Im}_2 \times \operatorname{Re}_1}{\operatorname{Im}_1 \times \operatorname{Im}_2 + \operatorname{Re}_1 \times \operatorname{Re}_2}\right], \quad (4)$$

которая и описывает изменение состояния объекта [9].

Метод восстановления изменения фазы во времени реализуется следующим образом. Регистрируется  $k$  голограмм исследуемого объекта в процессе изменения его состояния. Интенсивность  $k$ -й голограммы

$$I_k = \frac{1}{\tau} \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} I_k(t) dt, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время экспозиции.

Волна, отраженная поверхностью объекта в  $k$ -м состоянии, имеет вид

$$U(x, y, t) = |U_k(x, y, t)| \exp[i\varphi_k(x, y, t)]. \quad (6)$$

Это позволяет восстановить фазу  $\varphi_k(x, y, t)$  каждой точки исследуемого объекта для его  $k$ -го состояния. Причем данное состояние привязано к определенному моменту времени регистрируемого физического процесса.

Изменение фазы в голографической интерферометрии находится из соотношения [5]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{KA}. \quad (7)$$

Вектор чувствительности определяется пространственной геометрией системы регистрации. При изменении геометрии системы изменяется чувствительность интерферометра. Изменение вектора чувствительности при соответствующем изменении конфигурации схемы регистрации позволяет, на-

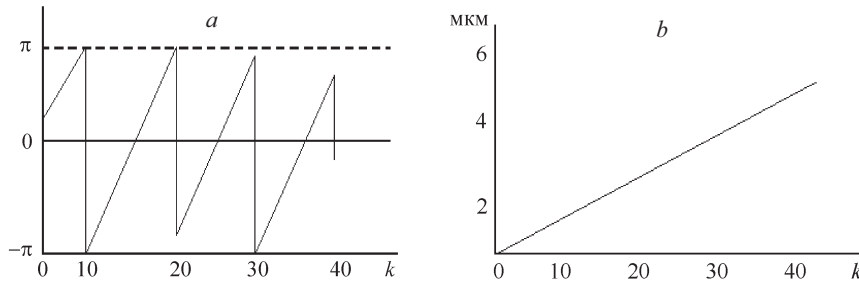


Рис. 2. Смоделированный процесс восстановления фазы: изменение фазы в течение процесса регистрации (а) и величина перемещения точек после восстановления фазы (b)

пример, регистрировать перемещения только в направлении наблюдения и исключить наблюдение перемещения точек в плоскости объекта. Также возможно и уменьшение влияния перемещения точек в направлении наблюдателя при увеличении чувствительности к перемещениям точек, движущихся в плоскости объекта [5].

Рассчитанная фазовая последовательность как функция времени лежит в пределах  $[-\pi, \pi]$ . Если за время регистрации фаза меняется в пределах  $[-\pi, \pi]$   $m$  раз, то общее изменение фазы от начального ее состояния до конечного составит  $\Delta\varphi + 2\pi m$  [10]. Данный алгоритм рассматривается в литературе как алгоритм непрерывного разворачивания фазы с учетом ее периодичности. Приведенный алгоритм является численным и используется при автоматизированном компьютерном анализе интерферограмм не только с временным распределением фаз, но и с пространственным. Подробное описание алгоритма с временным распределением фаз дано в [11].

Смоделированный результат восстановления фазы во времени представлен на рис. 2. С использованием выражения (7) рассчитывается перемещение точки объекта  $\mathbf{A}$  в течение процесса регистрации как функция времени. Предложенный метод имеет свои ограничения. Во избежание ошибки расчета перемещения вследствие периодичности рассчитанных фаз необходимо, чтобы изменение фазы между  $k$ -м и  $(k + 1)$ -м моментом регистрации всегда лежало в пределах  $[-\pi, \pi]$ . При большом перемещении соответствующая данному методу рассчитанная фаза может перейти в следующий физически обусловленный  $[-\pi, \pi]$   $m$ -й интервал, однако при численном расчете будет приниматься как значение фазы, близкое к предыдущему. Таким образом, следует принять условие регистрации максимального  $\mathbf{A}_{\max}$  перемещения точек объекта между ближайшими моментами регистрации с учетом коллинеарности  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$ , что соответствует наибольшей чувствительности метода:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{A}_{\max} < \pi. \quad (8)$$

**3. Измерение перемещений вибрирующего диска.** С помощью алгоритма вычисления разности фаз и определения перемещений, изложенных в разд. 2, осуществлено измерение вибраций на резонансной частоте 374 Гц металлического диска.

Величины перемещений точек, ориентированных вдоль нормали к поверхности, исследуемого объекта в соответствующих фазах колебания показаны на рис. 3, а–с.

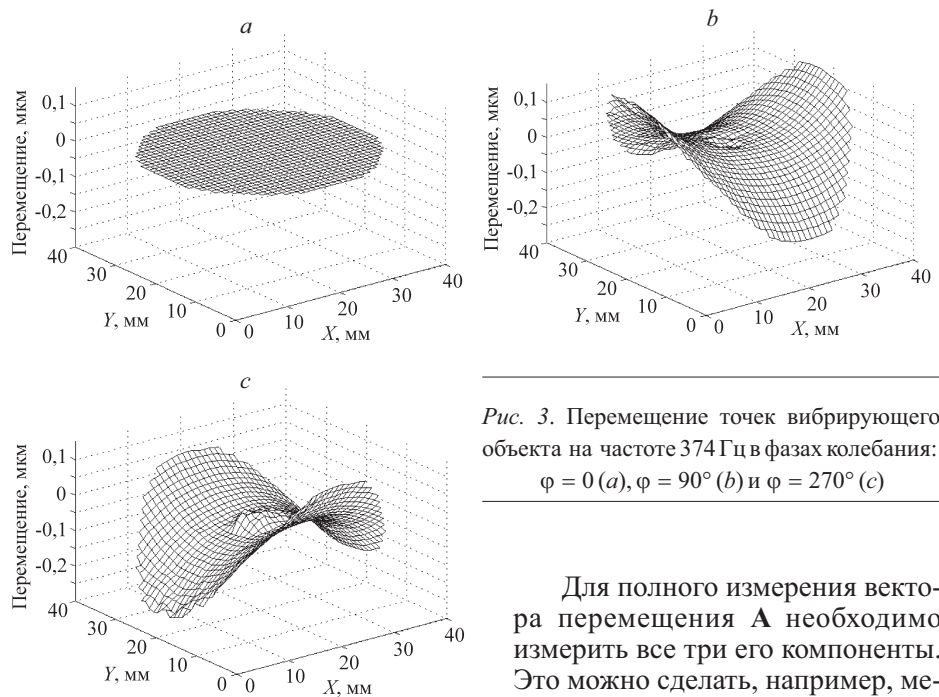


Рис. 3. Перемещение точек вибрирующего объекта на частоте 374 Гц в фазах колебания:  $\varphi = 0$  (a),  $\varphi = 90^\circ$  (b) и  $\varphi = 270^\circ$  (c)

Для полного измерения вектора перемещения  $\mathbf{A}$  необходимо измерить все три его компоненты. Это можно сделать, например, методом одновременной регистрации процесса с трех различных направлений.

Результаты измерений, представленные в работе, не полные, однако соответствуют физическому процессу, наблюдаемому в одной проекции. Получение полной информации о перемещении поверхности объекта – дополнительная техническая задача.

Отдельно следует отметить погрешности регистрации, численных методов расчета фазы и построения поверхности перемещений. Подобного рода погрешности зависят от ряда факторов: конфигурации системы регистрации, режима работы камеры (частоты дискретизации сигнала), компьютерной обработки изображения. Достаточно подробный анализ погрешности метода регистрации и расчета фаз можно найти в [5, 10]. В данной работе такой анализ не проводился.

**Заключение.** Представленный в работе метод прямого временного восстановления разности фаз без регистрации интерферограмм объединяет возможности цифровой и стробоскопической голографической интерферометрии и позволяет существенно сократить время измерения. Цифровые возможности были использованы для представления результатов в виде интерферометрического фильма, причем процесс регистрации полностью автоматизирован. Отличительной особенностью метода является то, что регистрация изменения фазы привязана ко времени протекания процесса, а поверхность деформированного состояния объекта развернута во времени. В классической интерферометрии изменение фазы соотносено с точками поверхности объекта и построение поверхности перемещений производится от начальной точки, произвольно выбранной экспериментатором, что приводит к построению поверхности относительного перемещения точек объекта. Использование предложенного метода позволяет измерить абсолютную величину перемещения каждой точки объекта от начального недеформированного состояния, когда  $\Delta\varphi < \pi$ .

К недостаткам данного метода следует отнести ограничения на частоту работы камеры и время экспозиции. Увеличение частоты периодического процесса приводит к увеличению пропусков периодов колебания, а также к уменьшению времени экспозиции, что в свою очередь приводит к недостатку энергии, необходимой для регистрации оптического сигнала. Минимальное время экспозиции камеры технически ограничено. Эти проблемы решаются с использованием источников лазерного излучения мощностью 10–15 Вт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Powell R. L., Stetson K. F.** Interferometric analysis by wavefront reconstruction // JOSA. 1965. **55**, N 8. P. 1593.
2. **Голографические** неразрушающие исследования /Под ред. Р. К. Эрфа: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979.
3. **Schnars U.** Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms // JOSA. 1994. **A11**. P. 2011.
4. **Pedrini G., Tiziani H. J., Zou Y.** Digital double pulse TV-holography // Opt. Lasers Eng. 1997. **26**. P. 199.
5. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. /Под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1982.
6. **Pedrini G., Osten W., Gusev M. E.** High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement // Appl. Opt. 2006. **15**. P. 3456.
7. **Onural L.** Sampling of the diffraction field // Appl. Opt. 2000. **39**. P. 5929.
8. **Takeda M., Hideki I., Kobayashi S.** Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // JOSA. 1982. **A72**. P. 156.
9. **Pedrini G., Tiziani H. J., Zou Y.** Digital double pulse-holographic interferometry for vibration analysis // Journ. Mod. Opt. 1995. **42**. P. 367.
10. **Huntley J. M., Saldner H.** Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis // Appl. Opt. 1993. **32**. P. 3047.
11. **Huntley J. M.** Automated analysis of speckle interferograms // Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques /Ed. P. K. Rastogi. Chichester, England: John Wiley and Sons, Inc., 2001. P. 59.

*Поступила в редакцию 29 декабря 2006 г.*