

УДК 535.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

В.Г. Гендин

Представлены результаты исследования точности определения малых смещений поверхности объектов методом цифровой голографии. Рассматривается процесс регистрации цифровых голограмм и восстановления фазовой информации из голограмм. Сравнивается точность определения нормальных смещений поверхности объекта при использовании двух методов устранения нулевого порядка дифракции с последующим вычислением фазы предметной волны.

Ключевые слова: цифровая голография, восстановление изображений, устранение нулевого порядка дифракции.

Введение

Формирование и анализ изображений трехмерных объектов – актуальная задача в различных областях науки и техники. При этом особенно важно получение количественных оценок геометрических характеристик исследуемых объектов. Известно, что наиболее высокую точность определения геометрических характеристик обеспечивают интерферометрические методы. Однако методы классической интерферометрии применимы только к объектам с оптически гладкими поверхностями и относительно малыми отклонениями от правильной геометрической формы. Исследования объектов произвольной формы с интерферометрической точностью возможны при использовании голографических методов, в том числе методов цифровой голографии [1, 2]. Отличительная особенность голографических методов состоит в том, что голограмма содержит полную информацию об оптическом поле предметной волны, при этом из голограммы можно извлечь всю необходимую фазовую и амплитудную информацию о предметной волне, характеризующей объект.

В настоящей работе представлены результаты исследования точности определения малых смещений поверхности объектов методами цифровой голографии при записи цифровых голограмм с использованием интерферометра Майкельсона. При этом задача устранения нежелательного нулевого порядка дифракции решается двумя методами: с помощью фильтрации высоких частот в голограмме и с использованием метода управляемого фазового сдвига, когда для определения смещения поверхности записываются две или более голограмм в различных положениях объекта и далее проводится восстановление информации об изменениях фазы предметной волны.

Запись цифровых голограмм с использованием интерферометра Майкельсона

Запись голограмм в цифровой голографии осуществляется посредством регистрации с помощью видеокамеры суммы предметной волны, отраженной от объекта, и опорной волны. Для реконструкции

изображения из голограммы используются вычислительные методы, позволяющие определить значения амплитуды и фазы предметной волны [1, 2].

Запись цифровых голограмм можно осуществить с использованием схемы, представленной на рис. 1.

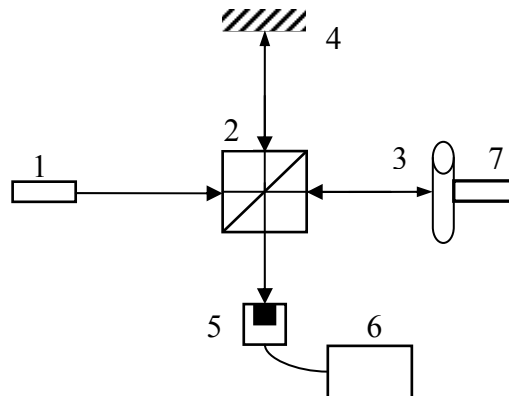


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона для записи цифровых голограмм: 1 – лазерный источник; 2 – светоделитель; 3 – исследуемый объект; 4 – опорное зеркало; 5 – ПЗС-видеокамера; 6 – вычислительная система; 7 – пьезоэлектрический преобразователь

Излучение лазерного источника 1 при помощи светоделителя 2 разделяется на предметную волну, освещающую исследуемый объект 3, и опорную волну, которая отражается от зеркала 4. Голограмма регистрируется при помощи видеокамеры 5. Реконструкция трехмерного изображения из голограммы выполняется в вычислительной системе 6.

Опорное зеркало 4 закреплено на площадке с микрометрическими винтами, которые позволяют задавать угол между направлениями распространения опорной и предметной волн для реализации внеосевой записи голограмм. Это необходимое условие для точного восстановления амплитудной и фазовой информации, так как в обычной осевой голограмме нулевой порядок дифракции, действительное и мнимое изображения наложены друг на друга, что затрудняет выделение мнимого изображения, характеризующего объект. Объект 3 закреплен на пьезоэлектрическом преобразователе 7, который позволяет задавать малые смещения объекта. При проведении экспериментов использовалась ПЗС-видеокамера 5 с выделением полезной области размером 320×240 пикселей. В качестве источника излучения использовали стабилизированный He-Ne лазер 1 с длиной волны 632 нм.

Пример голограммы объекта, полученной с использованием описанной схемы, представлен на рис. 2. Как отмечено выше, голограмма содержит полезную информацию о мнимом изображении объекта и две неинформативные составляющие, обусловленные наличием нулевого порядка дифракции и изображения-двойника (действительного изображения). Для выделения полезной информации из цифровой голограммы используются различные методики и вычислительные алгоритмы, рассматриваемые далее.

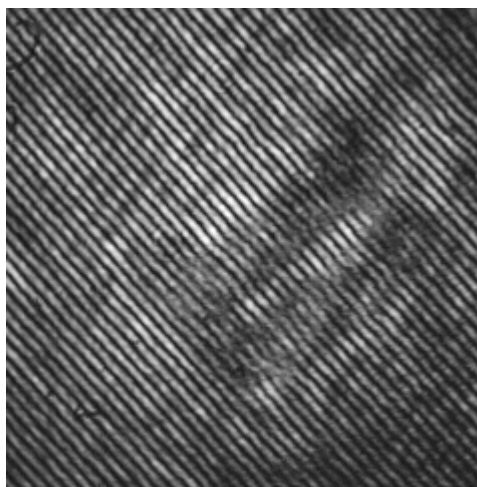


Рис. 2. Голограмма нерассеивающего объекта (5×5 мм)

Восстановление изображений из голограммы

Восстановленное дифрагированное поле в плоскости записи голограммы на расстоянии d от плоскости голограммы описывается интегралом Рэля–Зоммерфельда [1, 2]

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i d \frac{2\pi}{\lambda}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) I(x, y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right] dx dy, \quad (1)$$

где ξ, η – координаты в плоскости изображения; x, y – координаты в плоскости голограммы; λ – длина волны; d – расстояние от плоскости голограммы до плоскости изображения; $R(x, y)$ – комплексная амплитуда опорной волны; $I(x, y)$ – распределение интенсивности в плоскости голограммы. Интеграл (1) в цифровой голографии интерпретируется как двумерное преобразование Фурье опорной волны, объектной волны и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) I(x, y) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right) \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda d} (\xi x + \eta y)\right) dx dy. \quad (2)$$

Выражение (2) можно представить в форме

$$Q(v_\xi, v_\eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[i\pi\lambda d (v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \times \mathfrak{T}^+ [R(x, y) I(x, y) w(x, y)], \quad (3)$$

где $\mathfrak{T}^+ [R(x, y) I(x, y) w(x, y)]$ – прямое преобразование Фурье; v_ξ, v_η – пространственные частоты, соответствующие координатам в плоскости изображения (ξ, η),

$$v_\xi = \frac{\xi}{\lambda d}, \quad (4)$$

$$v_\eta = \frac{\eta}{\lambda d}. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) видно, что пространственные частоты зависят от длины волны и расстояния между плоскостями.

В цифровой голографии требуется выполнение критерия Найквиста, а именно, на каждый период наивысшей пространственной частоты в голограмме должны приходиться не менее двух отсчетов, т.е. светочувствительных ячеек (пикселей) оцифрованного изображения. Кроме этого, размер пикселя Δx ограничивает допустимое значение максимального угла α_{\max} при интерференции сферических вторичных волн от каждой точки объекта и опорной волны согласно условию

$$\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{2\Delta x}.$$

Точное восстановление распределения амплитуды и фазы объектной волны достигается только при условии соблюдения ограничения на расстояние d согласно соотношению

$$d \geq d_c = \frac{N\Delta x}{\lambda},$$

где N – количество пикселей в видеокамере (для координаты x). При $d = d_c$ возможно точное восстановление не только амплитуды, но и фазы, при этом размер пикселя восстановленного изображения равен размеру пикселя голограммы.

В настоящей работе при записи голограмм соблюдалось ограничение на значение максимального угла при внеосевой записи голограммы, а восстановление проводилось для расстояния $d = 27$ см, рассчитанного в соответствии с приведенными выше формулами и обеспечивающего точное восстановление фазы предметной волны.

Определение малых смещений поверхности объекта

Для определения малого нормального смещения поверхности объекта достаточно записать две голограммы (в исходном и конечном состоянии). При этом восстанавливаются фазы обеих голограмм с использованием соотношения

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(Q(\xi, \eta))}{\text{Re}(Q(\xi, \eta))}\right),$$

после чего вычисляются изменения фазы

$$\Delta\varphi(\xi, \eta) = \varphi_2(\xi, \eta) - \varphi_1(\xi, \eta).$$

Величина смещения в единицах длины определяется по очевидной формуле

$$\Delta d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi.$$

Для точного определения фазы предметной волны нужно вначале выделить информацию о мнимом изображении, а для этого, прежде всего, необходимо устранить нулевой порядок дифракции.

Устранение нулевого порядка дифракции

В работе исследовались два метода устранения нулевого порядка дифракции – с помощью фильтрации высоких частот и с использованием метода управляемого фазового сдвига.

Поскольку нулевой порядок дифракции – это непродифрагированная на низкочастотных участках голограммы волна, то устранить нулевой порядок дифракции можно путем подавления низких частот в голограмме. Изображение восстанавливается из голограммы без нулевого порядка дифракции в результате фильтрации в исходной голограмме высоких частот с малой частотой среза.

В методе фазового сдвига [1, 2] регистрируют три или более голограмм, смещенных относительно друг друга по фазе, для каждого состояния объекта. В настоящей работе использовался известный квадратурный алгоритм с записью четырех голограмм, сдвинутых относительно друг друга по фазе на $\pi/2$. Разность фаз задавалась пьезоэлектрическим преобразователем 7 (рис. 1). При этом набор голограмм можно представить в виде

$$\hat{I}(x, y) = (1/4R^*)\{I(x, y; \alpha = 0) - I(x, y; \alpha = \pi) + i[I(x, y; \alpha = \pi/2) - I(x, y; \alpha = 3\pi/2)]\}, \quad (6)$$

где значок * обозначает комплексно-сопряженную величину, и полученные в (6) значения подставляются в правую часть формулы (3) вместо величины $I(x, y)$.

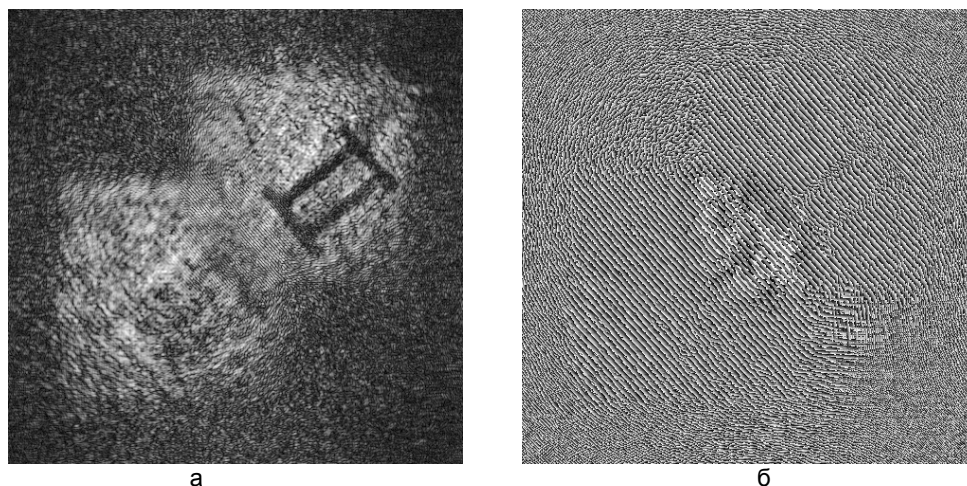


Рис. 3. Результат восстановления амплитуды предметной волны (а) и фазы предметной волны (б).
Размер изображений 10×10 мм

На рис. 3 представлен пример восстановления амплитуды и фазы предметной волны без нулевого порядка дифракции из голограммы (рис. 2). Объект представляет собой металлическую пластинку с вытравленным на ней символом (в виде римской цифры II).

Экспериментальное исследование точности определения малых смещений объекта

В схеме (рис. 1) с помощью пьезоэлектрического преобразователя 7 задавали малые смещения объекта и определяли эти смещения по изменениям фаз – с использованием рассмотренных выше методов при устранении нулевого порядка дифракции путем фильтрации высоких частот и с помощью метода фазового сдвига. Смещение задавалось в диапазоне 5–150 нм с шагом 10 нм. Погрешность позиционирования пьезоэлектрического преобразователя составляет 0,3 нм, т.е. пренебрежимо мала по сравнению с задаваемыми смещениями.

На рис. 4, 5 представлены графики зависимости отклонения измеренных значений смещения от заданных значений для двух методов устранения нулевого порядка дифракции. При этом рассчитанное смещение представлено как среднее значение смещения по всей плоскости объекта.

Из графиков следует, что среднее квадратическое отклонение (СКО) определения смещения для различных методов различно: для метода с использованием фильтрации СКО полученных смещений от заданных оно составляет 3,3 нм, а для метода фазового сдвига – 2,3 нм. Таким образом, метод цифровой голографии позволяет определять смещения поверхности объекта с погрешностью в единицы нанометров, что соответствует интерферометрической точности. Различные значения погрешностей при разных смещениях объясняются воздействием внешних факторов, таких как микровибрации. Точность измерений можно дополнительно повысить при обеспечении требуемой стабильности оптической схемы и устранении влияния внешних факторов.

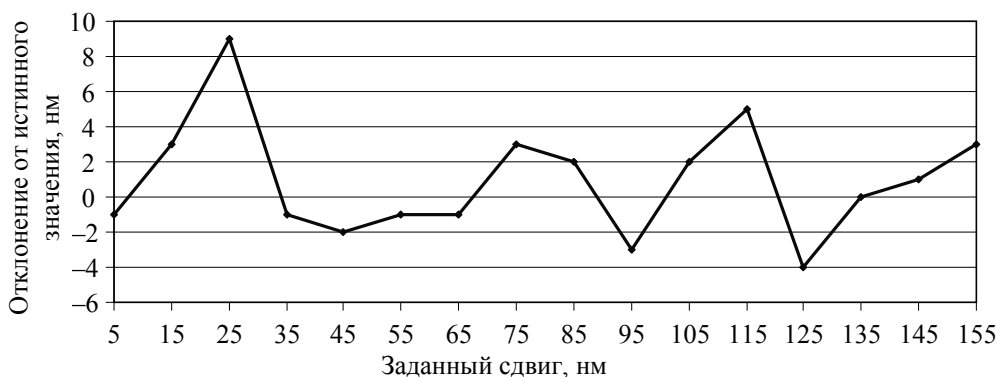


Рис. 4. График зависимости отклонения величины смещения от заданного значения при устранении нулевого порядка дифракции методом фильтрации высоких частот

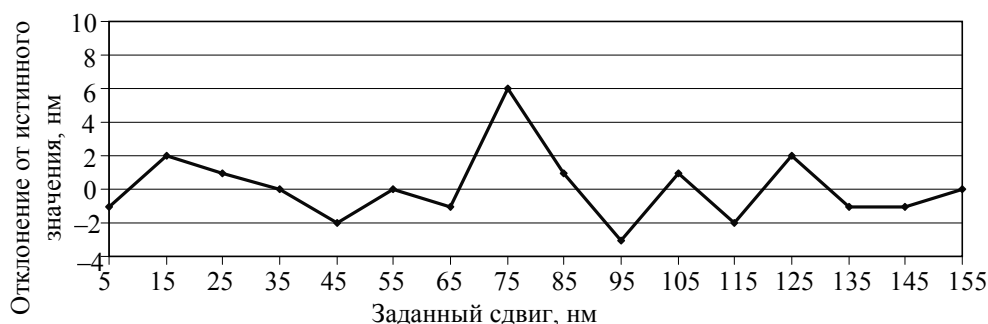


Рис. 5. График зависимости отклонения величины смещения от заданного значения при устранении нулевого порядка дифракции методом фазового сдвига

Заключение

Проведенные исследования показали, что метод цифровой голографии позволяет определять геометрические характеристики объектов с погрешностью в единицы нанометров. Применение метода фильтрации высоких частот и метода фазового сдвига для устранения нулевого порядка дифракции дают сопоставимые по точности результаты. Метод фильтрации высоких частот более прост в реализации. Однако метод фазового сдвига обеспечивает несколько более высокую точность, несмотря на необходимость записи и обработки нескольких голограмм, т.е. проведения более длительного эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Schnars U., Jueptner W. Digital Holography: Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 164 с.
2. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 91–117.

Гендин Владислав Геннадьевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vlad.gendin@gmail.com