

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ РАСШИФРОВКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

© 2013 г. **Е. Е. Майоров\***, канд. техн. наук; **В. Т. Прокопенко\*\***, доктор техн. наук;  
**А. С. Шерстобитова\*\***, канд. техн. наук

\* Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург

\*\* СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: mayorov\_ee@mail.ru

В работе описывается система, использующая принцип гетеродинной интерферометрии на базе двухчастотного лазера, для расшифровки голограмм, полученных от диффузно отражающей поверхности. Проведена оценка погрешности измерения фазы выходного сигнала, вносимая оптическими элементами системы.

**Ключевые слова:** гетеродинная интерферометрия, голограмма, акустооптический модулятор, интерферометр, спекл-шум, апертурный угол.

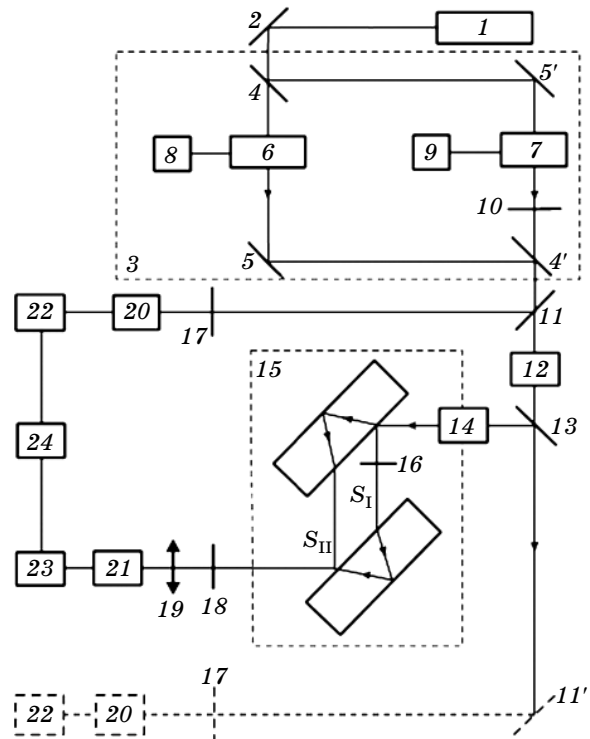
Коды OCIS: 090.2880.

Поступила в редакцию 10.10.2012.

Известно, что голограммная техника широко используется для диагностики качества и формы отражающих поверхностей различных объектов [1]. Однако при расшифровке голограмм, в особенности полученных от диффузно отражающих поверхностей, имеют место большие погрешности определения фазы выходного сигнала. Целью настоящих исследований является минимизация этой погрешности путем использования в оптической системе метода гетеродинной интерферометрии на базе двухчастотного лазера.

Этот метод позволяет исследовать напряженно-деформированные объекты с диффузно отражающей поверхностью, а сама голографическая интерферометрия является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных исследования.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Восстановление волновых фронтов, зарегистрированных на голограмме, осуществлялось с использованием излучения лазера 1 (ЛГ-79). Принцип гетеродинной интерферометрии реализовался с применением двухчастотного излучения, формируемого блоком 3. Последний построен на основе интерферометра Маха-Цендера, в плечах которого размещались акусто-оптические модуляторы 6 и 7 (использовались устройства типа МЛ-201). Модуляторы возбуждались напряжением вы-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 – лазер; 2, 5, 5', 11 – зеркала; 3 – блок формирования двухчастотного излучения; 4, 4', 11' – светоделители; 6, 7 – акустооптические модуляторы; 8, 9 – ВЧ генераторы; 10, 16 – полуволновые пластинки; 12, 14 – обрешивающие призмы; 13 – голограмма; 15 – интерферометр сдвига; 17, 18 – поляризаторы; 19 – линза; 20, 21 – фотоприемники; 22, 23 – усилители; 24 – измеритель разности фаз.

сокочастотных (ВЧ) генераторов 8 и 9. Сформированным двухчастотным излучением освещалась голограмма 13. Голограмма устанавливалась таким образом, что была возможность ее перемещения в своей плоскости и в направлении, перпендикулярном плоскости, а также – возможность вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в ее плоскости.

Для проведения фазовых измерений необходимо наличие двух каналов – опорного и измерительного. В схеме на рис. 1 сигнал опорного канала формировался из света, прошедшего голограмму 13. Такой подход удобно использовать в случае, когда геометрия освещения голограммы в процессе эксперимента остается неизменной. Когда геометрия освещения претерпевала изменение, для формирования опорного сигнала использовалось излучение, отраженное от светоделителя 11. Измерительный канал формировался в направлении распространения света, дифрагированного на голограмме.

С целью обеспечения повышенной стабильности параметров возбуждающего сигнала в ВЧ генераторах использовались кварцевые резонаторы с частотами  $f_8 = 62002$  кГц и  $f_9 = 62105$  кГц.

Пусть скорость распространения возбужденной акустической волны в модуляторе равна  $v_m$ , тогда шаг первой гармоники образующейся акустической решетки будет равен

$$\lambda_m = \frac{v_m}{f_B}, \quad (1)$$

где  $f_B$  – частота возбуждающего сигнала.

Частота первой гармоники светового сигнала  $f_g$  на выходе движущейся со скоростью  $v_m$  периодической структуры с шагом  $\lambda_m$  равна

$$f_g = \frac{v_m}{\lambda_m}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), получим, что частота интерференционного сигнала  $\Omega$  будет равна  $\Omega = f_9 - f_8 = 103$  кГц.

Электрические сигналы с выходов фотоприемников 20 и 21 обоих каналов после усиления подаются на входы измерителя разности фаз (использовался прибор Ф2-16). Резонансные усилители 22, 23 настроены на частоту интерференционного сигнала 103 кГц.

При сканировании голограммы фаза информационного сигнала изменяется соглас-

но изменению смещения [1–3] в соответствии с уравнением

$$\varphi = \mathbf{d}(\mathbf{k}_o - \mathbf{k}_n), \quad (3)$$

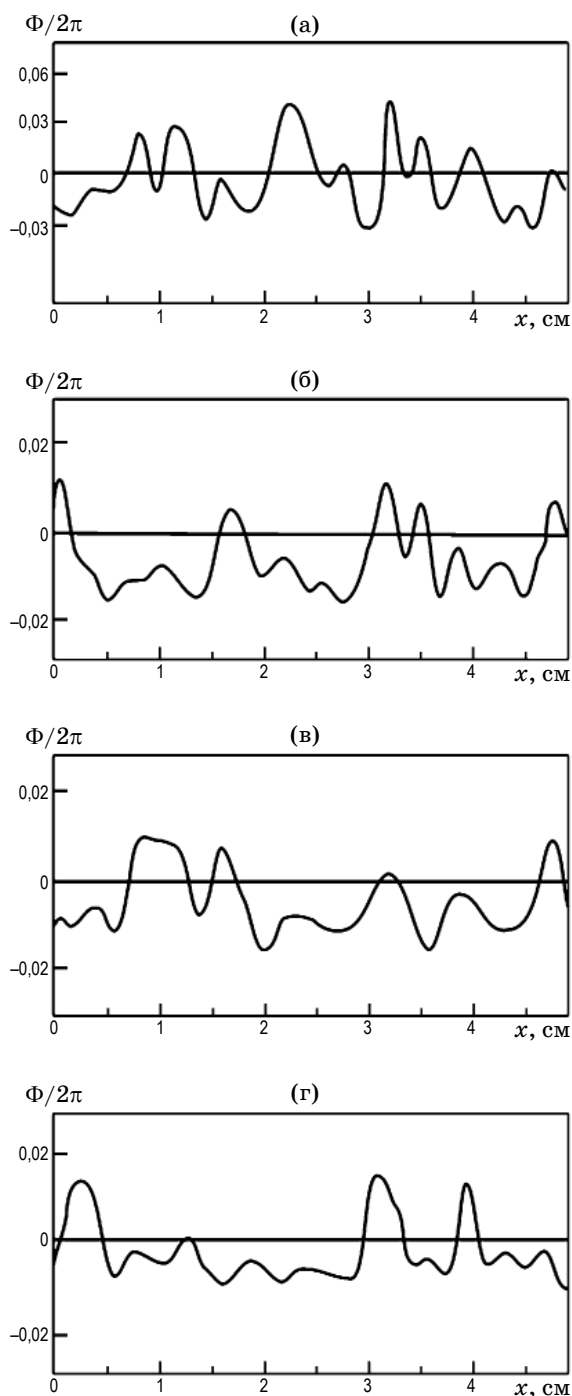
где  $\mathbf{k}_o$ ,  $\mathbf{k}_n$  – волновые векторы, характеризующие направления освещения и наблюдения соответственно;  $\mathbf{d}$  – вектор смещения,  $\varphi$  – фаза интерференционных полос.

Фаза опорного сигнала не зависит от величины и ориентации смещения точек поверхности контролируемого объекта. Поэтому показания измерителя разности фаз изменяются в соответствии с изменением вектора смещения.

Настройка системы заключается в согласовании вектора смещения, зарегистрированного на голограмме, с вектором сдвига, вносимого интерферометром. С этой целью на первом этапе производится согласование ориентаций векторов посредством вращения оборачивающей призмы 12. Контроль настройки осуществляется по максимуму сигнала фотоприемника 21. Затем производится согласование по величине смещения посредством настройки интерферометра. При этом критерием настройки является достижение максимального сигнала фотоприемника 21.

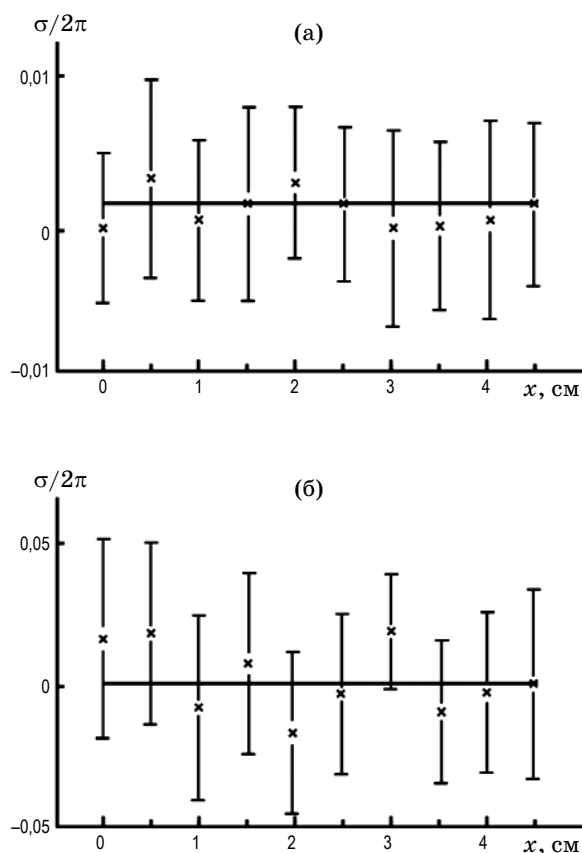
Алгоритм процесса измерений определяется поставленной задачей, требованиями, предъявляемыми к содержанию искомой информации, а также априорными сведениями о характере подлежащего определению вектора смещения. Целью работы являлась также проверка работоспособности системы фазовых измерений, основанных на использовании двухчастотного излучения. Контролю подлежали регистрируемые на двухэкспозиционной голограмме элементарные смещения.

Знание случайных изменений фазы выходного сигнала при сканировании голограммы позволяет дать оценку влияния спекл-шума и обусловленной этим фактором возможной погрешности измерений вектора смещения. Для проведения указанных исследований на голограмме регистрировалось однородное смещение объекта: объект между экспозициями смещался в своей плоскости как твердое целое. При восстановлении голограмма перемещалась относительно восстанавливающего пучка в плоскости установки. При этом регистрировались пространственное положение голограммы и соответствующее значение фазы выходного сигнала. Измерения проводились при различных апертурах восстанавливающей



**Рис. 2.** Единичные реализации флуктуаций фазы сигнала при различных апертурах восстанавливающего пучка  $D$ . а –  $D = 1,5$  мм, б –  $D = 2,0$  мм, в –  $D = 2,5$  мм, г –  $D = 3,0$  мм.

го пучка. Результаты исследований показаны на рис. 2 и рис. 3. На рис. 2 представлены единичные реализации процесса сканирования для различных размеров восстанавливающего пучка. На графиках хорошо видны степень усреднения флуктуаций по координате скани-



**Рис. 3.** Среднеквадратическое отклонение фазы сигнала от среднего значения при перемещении голограммы. а –  $D = 2,0$  мм, б –  $D = 3,0$  мм.

рования для разных диаметров восстанавливающего пучка.

На рис. 3 представлены данные флуктуаций фазы сигнала после усреднения по 10 реализациям для каждой точки (доверительная вероятность – 0,95). Как следует из графиков, среднеквадратическое отклонение фазы сигнала для диаметра пучка 3 мм не превышает  $0,005 \times 2\pi$  рад.

На голограмме регистрировалось линейное смещение объекта (алюминиевый параллелепипед с диффузно отражающей поверхностью) по схеме, изображенной на рис. 4. Смещение объекта проводилось с помощью столика (ОСК-2) с микрометрической подвижной частью. В качестве независимого контроля использовался датчик линейных смещений 1МИГ с ценой деления 1 мкм. Геометрия схемы расшифровки голографических интерферограмм изображена на рис. 4. Расшифровка проводилась с учетом априорных данных об ориентации искомого вектора смещения.

Для нахождения исходной величины смещения  $d$  решалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha_1, \\ \Phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – различные направления освещения,  $\Phi_1, \Phi_2$  – соответствующие показания измерителя разности фаз,  $\lambda$  – длина волны восстанавливающего излучения.

Из (4) получаем

$$d = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\frac{2\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}.$$

Изменение угла освещения выполнялось с помощью оборачивающей призмы 12 (рис. 1). Отметим, что в этом случае опорный сигнал

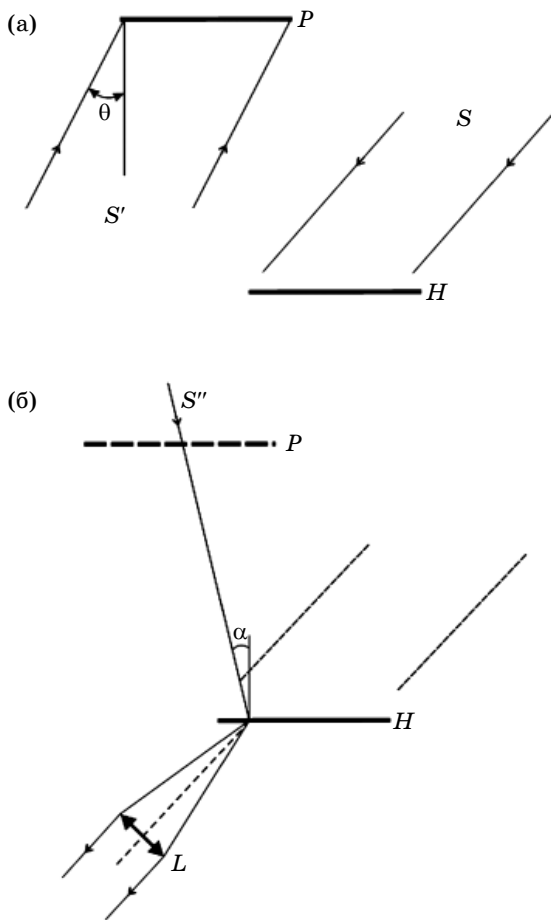


Рис. 4. Геометрия схем регистрации (а) и восстановления (б).  $S'$  – освещающий пучок,  $P$  – объект,  $S$  – опорный пучок,  $H$  – голограмма,  $S''$  – восстанавливающий пучок,  $L$  – линза.

системы измерений формировался с использованием излучения, отраженного от светоделителя 11.

Результаты измерений и определения смещения показаны на рис. 5. Как следует из графических представлений, результаты измерений хорошо согласуются с контрольным отсчетом по датчику линейных перемещений. Из рис. 5 видно, что величина среднеквадратического отклонения от среднего значения не превосходит для  $d = 30$  мкм – 0,1 мкм, для  $d = 100$  мкм – 0,25 мкм.

Погрешность измерений, связанная со спецификой съема информации с голографической интерферограммы, достаточно подробно рассмотрена в [4]. В предлагаемой системе дополнительная ошибка измерений обусловлена необходимостью поворота плоскости поляризации излучения с помощью полуволновой пластинки в одном из плеч интерферометра сдвига (рис. 1)

Действительно, свет от голограммы распространяется в апертурном угле 0,1–0,2 рад. Отметим, что имеется в виду только свет, попадающий в приемную апертуру фотоприемника. Толщина полуволновой пластины рассчитывается исходя из конкретной длины вол-

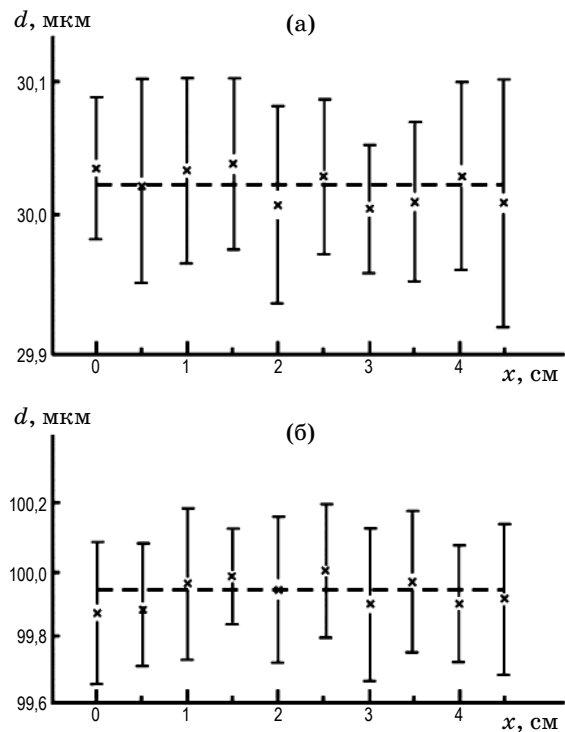


Рис. 5. Результаты измерения перемещения объекта. а –  $d = 30$  мкм, б –  $d = 100$  мкм.

ны и для нормального падения лучей света. Ясно, что наличие в падающей пучке лучей, отличных от нормальных, приведет к нарушению линейности поляризации выходного излучения.

Таким образом, погрешность измерения обусловлена изменением толщины пластинки  $\lambda/2$  (рис. 1) для различных углов падающих лучей, т. е. появлением в пучке нелинейно поляризованных колебаний. Толщина пластинки  $\lambda/2$ , необходимая для линейной поляризации, равна [5]

$$h_0 = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{n_o - n_e} + \frac{m\lambda}{n_o - n_e},$$

где  $m$  – целое число,  $\lambda$  – длина волны,  $n_o$  и  $n_e$  – показатель преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей.

Лучи, падающие на полуволновую пластинку под углом  $\alpha_n$ , приобретают дополнительный набег фазы за счет прохождения участка длиной

$$h = \frac{h_0}{\cos \alpha_n}.$$

При этом колебания  $E_{v2}^I$  и  $E_{v1}^{II}$ , участвующие в интерференции, приобретают дополнительную перпендикулярную составляющую  $B_{v1}^I$ .

Наличие  $B_{v1}^I$  вызывает фазовую погрешность измерений. Анализ ее влияния [5] определяет погрешность фазы как

$$\delta\Phi = \frac{\pi}{\lambda} h_0 \left( \frac{1}{\cos \alpha_n} - 1 \right) (n_o - n_e).$$

Так, при  $n_o - n_e = 0,005$  (для слюды)  $\delta\Phi = 0,003 \times 2\pi$  рад.

По результатам проведенной работы можно сделать следующий вывод.

Проведено экспериментальное исследование системы обработки голографических интерферограмм, и дана оценка погрешности измерений.

Разработана и описана экспериментальная установка оптико-электронной фазоизмерительной системы расшифровки голографических интерферограмм.

Измерены флуктуации фазы выходного сигнала.

Проведено экспериментальное определение смещений диффузно отражающих объектов, зарегистрированных на двухэкспозиционной голограмме.

Дана оценка погрешности измерений, обусловленной необходимостью поворота плоскости поляризации излучения с помощью полуволновой пластины в одном из плеч интерферометра сдвига.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. 1967. Т. 37. В. 2. С. 360–365.
2. Ennos A.E. Measurement of in-plane surface strain by hologram interferometry // Sci. Instrum. Ser. II. 1968. V. 58. № 1. P. 731–734.
3. Sollid J.D. Holographic interferometry applied to measurements of small static displacements of diffusely reflecting surfaces // Appl. Opt. 1969. V. 8. P. 1587–1595.
4. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 176 с.
5. Большаков О.П., Котов И.Р., Хопов В.В., Майоров Е.Е. Обработка голографических интерферограмм и спеклограмм с использованием двухчастотного лазера // Научно-технич. вестник СПб ГУ ИТМО. 2003. В. 11. С. 21–24.