

О. П. БОЛЬШАКОВ, И. Р. КОТОВ, Е. Е. МАЙОРОВ, В. Т. ПРОКОПЕНКО

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЕСТНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА

Рассматривается работа интерферометра сдвига как элемента настройки интерференционных полос при обработке двухэкспозиционных голограмм диффузно отражающих объектов. Представлен теоретический анализ влияния перекрестной интерференции на точность измерения фазы полос.

*Ключевые слова:* голография, интерференция, интерферометр сдвига.

Метод голографической интерферометрии находит широкое применение при неразрушающем контроле, а также при измерении величины смещений и деформаций диффузно отражающих объектов. Интерес к использованию этого метода обусловлен его высокой информативностью, возможностью получения трехмерных изображений и отсутствием предметных связей с изучаемым объектом. Среди методов оптической обработки голографических интерферограмм следует особо выделить метод гетеродинной голографической интерферометрии [1], который позволяет считывать информацию с точностью до 0,001 интерференционной полосы. Эффективное использование этого метода предусматривает операцию настройки интерференционных полос. Способ настройки шага полос для изменения геометрии схемы их восстановления за счет второго опорного пучка не лишен недостатков и имеет существенные ограничения по величине компенсируемых смещений и наклонов объектов, что оказывает значительное влияние на качество восстановленного изображения и интерферограммы [2, 3]. Использование для настройки полос интерферометра сдвига [4, 5] свободно от указанных недостатков, однако остается открытым вопрос о влиянии на погрешность измерений перекрестной интерференции световых лучей на выходе интерферометра.

В настоящей статье анализируется работа интерферометра сдвига как элемента настройки интерференционных полос при обработке двухэкспозиционных голограмм диффузно отражающих объектов. На рис. 1 представлена схема, отображающая элементы интерференционной системы и поясняющая принцип настройки полос при расшифровке голографических интерферограмм. Наличие смещения  $d_n$  пластины, вносимого интерферометром, обусловлено

изменением его настройки. При равенстве смещения  $d_n$  величине основного смещения  $d$  результирующее смещение равно нулю. При этом лучи  $b_1, a_2$  совмещены в пространстве, интерференционная картина представлена бесконечно широкой полосой, и составляющая  $U_\Delta$  сигнала фотоприемника имеет максимальное значение.

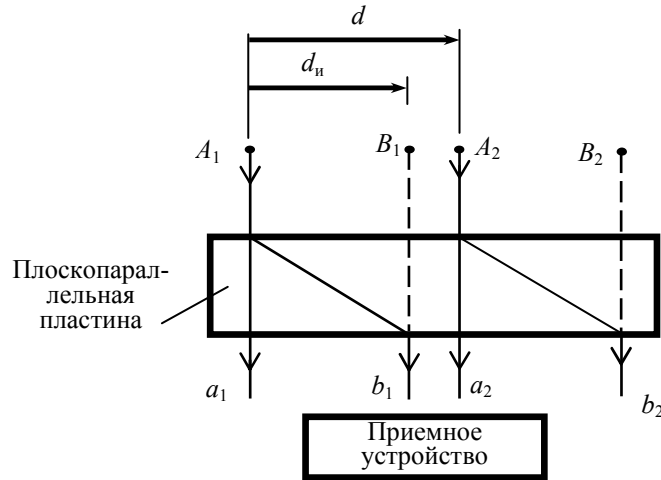


Рис. 1

Величина измеряемого смещения  $d$  в соответствии с известным уравнением для интерпретации голографических интерферограмм [6]

$$\varphi = d(\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_0),$$

где  $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_n$  — волновые векторы, характеризующие направление освещения и направление наблюдения соответственно,  $\varphi$  — фаза интерференционных полос, характеризует изменение фазы полос  $\Delta\varphi$ .

Метод гетеродинной голографической интерферометрии позволяет преобразовать фазу  $\varphi$  интерференционных полос в фазу  $\Phi$  электрического сигнала, которая измеряется с помощью устройств электронной техники. Поскольку измеряется величина  $\Phi$ , точность определения смещения  $d$  зависит от степени соответствия изменения разности фаз лучей  $\Delta\varphi$  изменению фазы сигнала  $\Delta\Phi$ . В идеальном случае  $\Delta\Phi = \Delta\varphi$ . Однако наличие в выходном сигнале составляющих  $U_n$  и  $U_\Sigma$  перекрестной интерференции, обусловленных когерентным сложением лучей  $(a_1, b_1), (a_1, a_2), (a_1, b_2), (b_1, b_2), (a_2, b_2)$  — см. рис. 1, нарушает это равенство, что приводит к погрешности определения смещения  $d$ .

Для анализа этой погрешности необходимо оценить отклонение  $\delta\varphi$  измеряемой фазы  $\Phi$  электрического сигнала от истинного значения  $\varphi$ :

$$\delta\varphi = \Delta\varphi - \Delta\Phi.$$

Выражение для фазы  $\Phi$  электрического сигнала можно получить, проинтегрировав результат интерференции лучей на выходе интерферометра с учетом фазовых соотношений:

$$\Phi = \text{arctg}(\xi_1, \xi_2),$$

$$\xi_1 = \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n d_n}{\lambda}}{d_n} \sin \varphi_{n0} + \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n (d_n + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_n + d + \Delta d} \sin(\varphi_{n0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \sin \Delta\varphi,$$

$$\xi_2 = \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n d_n}{\lambda}}{d_n} \cos \varphi_{n0} + \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n (d_n + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_n + d + \Delta d} \cos(\varphi_{n0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \cos \Delta\varphi,$$

где  $2\alpha_n$  — апертурный угол наблюдения;  $\Delta d$  — величина, характеризующая расстройку интерферометра;  $\lambda$  — длина волны восстанавливающего излучения;  $\varphi_0 = \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda}$  и  $\varphi_{и0} = \frac{2\pi\alpha_0 d_{и}}{\lambda}$  — начальная фаза полос и фаза полос при смещении, где  $\alpha_0$  — угол, соответствующий биссектрисе апертуры наблюдения.

Расчеты выполнены для настроенного интерферометра при различных значениях апертуры фотоприемника  $2\alpha_n$  (рис. 2), при этом  $d_{и} = d$ ,  $\Delta d = 0$ . Как следует из графических зависимостей, меньшая фазовая ошибка (кривая 1) соответствует меньшей апертуре фотоприемника (в отличие от кривых 2, 3). Это объясняется тем, что при меньшей апертуре влияние составляющих  $U_{и}$  и  $U_{\Sigma}$  сигнала на значение измеряемой фазы сигнала менее критично.

При небольших значениях  $d$  превышение  $U_{\Delta}$  относительно  $U_{и}$  и  $U_{\Sigma}$  не столь очевидно (рис. 3), следствием чего является значительная погрешность измерения (до 0,06 рад). По мере увеличения измеряемого смещения погрешность снижается практически до нуля, что объясняется еще более значительным доминированием амплитуды составляющей  $U_{\Delta}$  (кривая 3) относительно  $U_{и}$  и  $U_{\Sigma}$  (кривые 1, 2). Анализ графиков на рис. 3 показывает также, что зависимость  $\delta\varphi$  от величины смещения  $d$  можно сделать сколь угодно малой, придав дополнительное искусственное смещение объекту между экспозициями. Так, при дополнительном смещении примерно 10 мкм максимальная погрешность не превышает 0,001 доли интерференционной полосы.

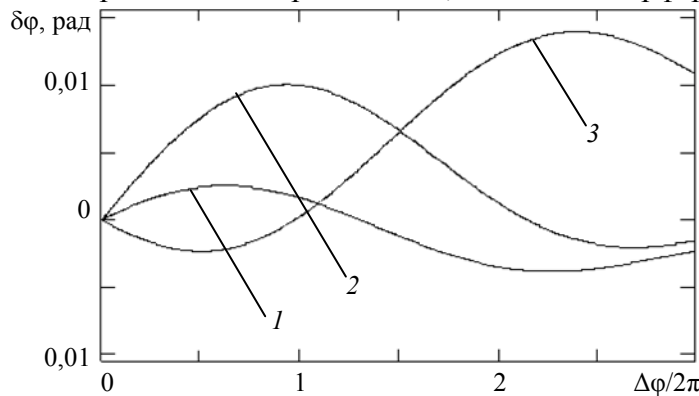


Рис. 2

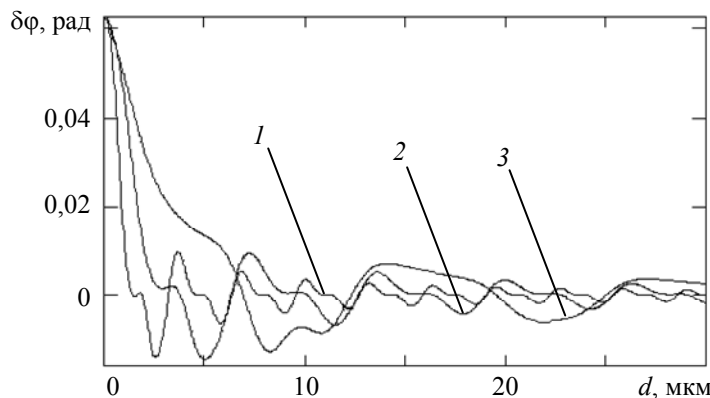


Рис. 3

Таким образом, анализ настройки интерференционных полос с использованием интерферометра сдвига показал, что погрешность измерения фазы полос, обусловленная наличием перекрестной интерференции, не превышает 0,015 рад, что составляет 0,002 доли интерференционной полосы. Для величин измеряемых смещений, превышающих 10 мкм, вышеупомянутой погрешностью практически можно пренебречь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dandliker R.* Heterodyne holographic interferometry // *Progress in Optics*. 1980. Vol. 7. P. 3—81.
2. *Thalman R., Dandliker R.* Strain measurement by heterodyne holographic interferometry // *Applied Optics*. 1987. Vol. 26, N 10. P. 1964—1971.
3. *Banyasz I., Kiss G., Varga P.* Holographic image of a point source in the presence of misalignment // *Applied Optics*. 1988. Vol. 27, N 7. P. 1293—1297.
4. *Нагибина И. М., Хопов В. В.* Автоматизированная обработка голографических интерферограмм при определении вектора смещения диффузно отражающих поверхностей // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1983. Т. 26, № 2. С. 80—84.
5. *Большаков О. П., Котов И. Р., Майорова О. В.* Настройка параметров интерференционного поля в голографической интерферометрии // *Материалы XI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы „Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах“*. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2007. С. 143.
6. *Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М.* Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // *ЖТФ*. 1967. Т. 37, вып. 2. С. 360—365.

**Сведения об авторах**

- Олег Петрович Большаков** — д-р мед. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, кафедра оперативной хирургии и клинической анатомии; E-mail: irkotov@mail.ru
- Игорь Ростиславович Котов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, лаборатория голографии; E-mail: irkotov@mail.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики; E-mail: mayogov\_ee@mail.ru
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
твердотельной оптоэлектроники СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
29.12.11 г.