

Е. Е. МАЙОРОВ, В. Т. ПРОКОПЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ГЕТЕРОДИННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ОДНИМ ОПОРНЫМ ПУЧКОМ

Рассмотрена возможность использования двухчастотного излучения для реализации принципа гетеродинной голографической интерферометрии. Такой подход к смещению оптических частот восстановленных интерферирующих волн позволяет задействовать один опорный пучок при регистрации голограммы. Он реализован при использовании излучения, содержащего волны с различными частотами и ортогональными поляризациями в сочетании с интерферометрией сдвига. Получены основные математические соотношения для параметров выходного сигнала: сформирован переменный во времени сигнал, определена фаза сигнала, которая содержит информацию о векторе смещения.

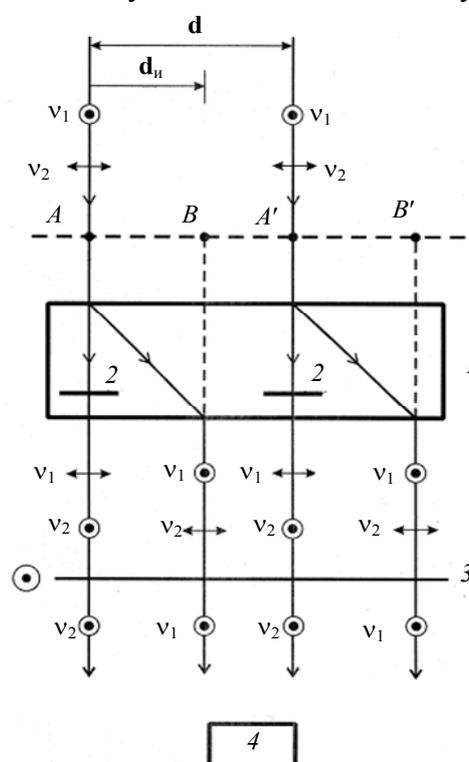
**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, интерферометр, голограмма, диффузно отражающий объект.

Метод голографической интерферометрии широко используется при решении задач неразрушающего контроля и исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов. Особый интерес к этому методу обусловлен его высокой информативностью, возможностью получения трехмерных изображений изучаемых объектов и отсутствием материальных связей с ними [1].

Основная цель применения двухчастотного излучения в голографической интерферометрии — реализовать принцип гетеродинирования, избавившись при этом от второго опорного пучка [2].

Под двухчастотным будем понимать излучение, при котором в одном световом пучке присутствуют две волны с различными оптическими частотами и ортогональными поляризациями. В работах [3, 4] рассматривались отдельные вопросы использования поперечно-сдвиговой интерферометрии и двухчастотного излучения применительно к методу спекл-фотографии. В статье [4] также высказано предположение о возможности использования двухчастотного излучения не только в методе спекл-фотографии, но и в голографической интерферометрии. В настоящей работе покажем, каким образом можно реализовать принцип гетеродинной голографической интерферометрии с применением двухчастотного излучения и поперечно-сдвиговой интерферометрии, задействовав при этом один восстанавливающий (опорный) пучок (см. рисунок).

На рисунке приведены элементы физической системы для реализации предлагаемого метода оптической обработки голографических интерферограмм:  $A, A'$  — одинаковые элементы;  $B, B'$  — мнимые изображения элементов  $A, A'$ ;  $I$  — интерферометр сдвига,  $2$  — полуволновая



пластинка, 3 — поляризатор, 4 — фотоприемник,  $\mathbf{d}$  — вектор смещения соответствующих элементов,  $\mathbf{d}_и$  — смещение интерферометра.

Будем считать, что на двухэкспозиционную голограмму, на которой зарегистрированы два положения исследуемого объекта, попадает восстанавливающий пучок излучения, содержащего две волны с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$  и ортогональными поляризациями. В соответствии с общепринятой моделью интерпретации голографических интерферограмм [1] будем считать, что в формировании интерференционного поля участвует свет, рассеянный элементами поверхности  $A$  и  $A'$ . Если излучение содержит две оптические частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , свет, исходящий от точек  $A$  и  $A'$ , также содержит волны с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Пусть  $a_1, a_2, a_3, a_4$  — волны на выходе интерферометра. Запишем выражения для амплитуд волн, участвующих в интерференции, учитывая, что поляризатор не пропускает колебания, плоскости которых перпендикулярны его оси:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_{10} e^{i(\nu_2 t + \varphi_1)}, \\ a_2 &= a_{20} e^{i(\nu_1 t + \varphi_2)}, \\ a_3 &= a_{30} e^{i(\nu_2 t + \varphi_3)}, \\ a_4 &= a_{40} e^{i(\nu_1 t + \varphi_4)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Соответствующие фазы световых колебаний запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &= \varphi_1 + \varphi_и, \\ \varphi_3 &= \varphi_1 + \varphi, \\ \varphi_4 &= \varphi_1 + \varphi_u + \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  — фаза колебания волны  $a_1$ ;  $\varphi_и$  — разность фаз, вносимая интерферометром;  $\varphi$  — разность фаз лучей от соответствующих элементов.

Интенсивность светового потока на выходе интерферометра в результате интерференции равна произведению комплексно сопряженных сумм амплитуд:

$$\begin{aligned} I &= (a_1 + a_2 + a_3 + a_4)(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)^* = \\ &= \left[ a_{10} e^{i(\nu_2 t + \varphi_1)} + a_{20} e^{i(\nu_1 t + \varphi_2)} + a_{30} e^{i(\nu_2 t + \varphi_3)} + a_{40} e^{i(\nu_1 t + \varphi_4)} \right] \times \\ &\times \left[ a_{10} e^{-i(\nu_2 t + \varphi_1)} + a_{20} e^{-i(\nu_1 t + \varphi_2)} + a_{30} e^{-i(\nu_2 t + \varphi_3)} + a_{40} e^{-i(\nu_1 t + \varphi_4)} \right] = \\ &= a_{10}^2 + a_{10} a_{20} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_1 - \varphi_2]} + a_{10} a_{30} e^{i[\varphi_1 - \varphi_3]} + a_{10} a_{40} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_1 - \varphi_4]} + \\ &+ a_{20}^2 + a_{20} a_{10} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_2 - \varphi_1]} + a_{20} a_{40} e^{i[\varphi_2 - \varphi_4]} + a_{10} a_{30} e^{i[\varphi_3 - \varphi_1]} + \\ &+ a_{30} a_{20} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_3 - \varphi_2]} + a_{30}^2 + a_{30} a_{40} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_3 - \varphi_4]} + a_{10} a_{40} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_4 - \varphi_1]} + \\ &+ a_{40} a_{20} e^{i[\varphi_4 - \varphi_2]} + a_{40}^2 + a_{40} a_{30} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_4 - \varphi_3]} + a_{40} a_{20} e^{i[\varphi_4 - \varphi_2]}. \end{aligned}$$

Обозначив  $\nu_2 - \nu_1 = \omega$ , с учетом соотношений (2) представим выражение для результирующей интенсивности в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 I = & a_{10}^2 + a_{20}^2 + a_{30}^2 + a_{40}^2 + a_{10}a_{20} \left[ e^{i(\omega t - \varphi_n)} + e^{-i(\omega t - \varphi_n)} \right] + a_{10}a_{30} \left[ e^{-i\varphi} + e^{i\varphi} \right] + \\
 & + a_{10}a_{40} \left[ e^{i[\omega t - (\varphi + \varphi_n)]} + e^{-i[\omega t - (\varphi + \varphi_n)]} \right] + a_{20}a_{40} \left[ e^{-i\varphi} + e^{i\varphi} \right] + \\
 & + a_{20}a_{30} \left[ e^{i[\omega t + (\varphi - \varphi_n)]} + e^{-i[\omega t + (\varphi - \varphi_n)]} \right] + a_{30}a_{40} \left[ e^{i(\omega t - \varphi_n)} + e^{-i(\omega t - \varphi_n)} \right]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$ , и полагая  $a_{10} = a_{20} = a_{30} = a_{40} = a$ , запишем выражение (1) в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned}
 I = & 4a^2 + 2a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 2a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + \\
 & + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t) + 2a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) = \\
 = & 4a^2 + 4a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 4a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Информация об искомом векторе смещения содержится в разности фаз  $\varphi$ , которую, в свою очередь, можно выделить из фазы переменной составляющей сигнала  $I'$  на выходе фотоприемника. Выделим последнюю из выражения (4):

$$I' = 4a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t).$$

Таким образом, оптическая обработка голографических интерферограмм с использованием двухчастотного излучения и интерферометрии сдвига позволила реализовать принцип гетеродинной интерферометрии:

- сформировать переменный во времени сигнал,
- показать, что в фазу сигнала входит параметр  $\varphi$ , который содержит информацию о векторе смещения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. 1967. Т. 37, вып. 2. С. 360—365.
2. Большаков О. П., Котов И. Р., Майоров Е. Е., Майорова О. В., Хопов В. В. Расшифровка голографических интерферограмм с использованием гетеродинной интерферометрии сдвига // Фундаментальные исследования в технических университетах: Матер. VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2004. С. 66.
3. Большаков О. П., Котов О. И., Майоров Е. Е., Хопов В. В. Обработка голографических интерферограмм и спеклограмм с использованием двухчастотного лазера // Сб. науч. статей „Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов“ / Под ред. Ю. А. Гатчина, В. Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 184—187.
4. Большаков О. П., Котов И. Р., Хопов В. В., Майоров Е. Е. Обработка голографических интерферограмм и спеклограмм с использованием двухчастотного лазера // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2003. Вып. 11. С. 21—24.

#### Сведения об авторах

**Евгений Евгеньевич Майоров**

— канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: majorov\_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

Поступила в редакцию  
02.04.12 г.