

07;12

## Применение муарового эффекта при оптической обработке изображений амплитудной периодической решетки, искаженных восстановленным волновым фронтом

© А.И. Буть, А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
230023 Гродно, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 21 февраля 1996 г. В окончательной редакции 12 августа 1996 г.)

Предложено использовать муаровый эффект при наложении искаженных восстановленным волновым фронтом изображений амплитудной решетки для повышения чувствительности измерений углов отклонения восстановленных лучей.

Теневые методы исследования восстановленного волнового фронта широко используются в голографической интерферометрии нестационарных процессов с наличием фазовых неоднородностей, отклоняющих световые лучи на большие углы [1,2]. Различные модификации метода расфокусированных диафрагм, являясь разновидностью количественных теневых методов, позволяют определять углы отклонения световых лучей неоднородностями фазового объекта [3].

Данная работа посвящена дальнейшему развитию количественного теневого метода исследования деформаций восстановленного волнового фронта, основанного на получении искаженного изображения вынесенной расфокусированной амплитудной решетки [4]. На основе муарового эффекта рассмотрена возможность повышения информативности метода и точности количественных измерений за счет увеличения чувствительности метода.

На рис. 1 представлена схема восстановления волнового фронта однократно экспонированной голограммой сфокусированного изображения фазового объекта и последующего его исследования. В положении 1 располагается визуализирующая амплитудная решетка, которая по нормали освещается коллимированным пучком монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ . Пройдя решетку 1, промодулированный по амплитуде плоский волновой фронт падает на объектную голограмму 2, расположенную на расстоянии  $L$  относительно решетки 1. Амплитудное пропускание однократно экспонированной голограммы сфокусированного изображения фазового объекта описывается выражением [1]

$$\tau(x, y) \sim 1 + \cos \left[ \frac{2\pi x}{P} + \phi(x, y) \right], \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты в плоскости голограммы, причем ось  $Y$  параллельна голографическим полосам с периодом  $P$ ;  $\phi(x, y)$  — искажения фазы, вызванные исследуемым объектом.

Так как фазовые искажения волн, восстановленных в плюс и минус первых порядках, имеют противоположные знаки, то углы отклонения световых лучей от прямолинейного распространения, вызванные неоднородностями

фазового объекта, также будут иметь противоположные знаки. Например,  $x$ -составляющие углов для восстановленных волн в плюс и минус первых порядках будут пропорциональны соответственно

$$\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \quad \text{и} \quad - \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x}.$$

Предположим, что увеличение телескопической системы, образованной объективами 3, 5, равно единице, а период полос голограммы  $P$  и амплитудной решетки  $T$  удовлетворяют условию  $P \ll T$ . Для определения  $x$ -составляющих углов отклонения лучей, восстановленных голограммой, от прямолинейного направления, т.е.  $\varepsilon_x$ , необходимо штрихи решетки ориентировать параллельно оси  $Y$ . Если в фурье-плоскости объектива 3 с помощью пространственного фильтра (диафрагмы с отверстиями) 4 выделить комплексно сопряженные  $\pm 1$  порядки дифракции волн на голограмме, то можно показать с учетом (1), что в оптически сопряженной с голограммой плоскости 6 распределение комплексных амплитуд волн будет иметь соответственно вид

$$A_{+1}(x, y) = \cos \left[ \frac{2\pi x}{T} + \frac{2\pi L \varepsilon_x}{T} \right] \times \exp \left\{ 1 \left[ \frac{2\pi x \cos \alpha}{\lambda} + \phi(x, y) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$A_{-1}(x, y) = \cos \left[ \frac{2\pi x}{T} - \frac{2\pi L \varepsilon_x}{T} \right] \times \exp \left\{ -1 \left[ \frac{2\pi x \cos \alpha}{\lambda} + \phi(x, y) \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $\cos \alpha$  — направляющий косинус волны, дифрагированной в первом порядке, определяемый как  $\cos \alpha = \lambda/P$ .

Первые сомножители в выражениях (2), (3) определяют действительные амплитуды волн  $A_{+1}(x, y)$ ,  $A_{-1}(x, y)$ . Пространственная модуляция действительных амплитуд обусловлена наличием низкочастотной амплитудной решетки 1.

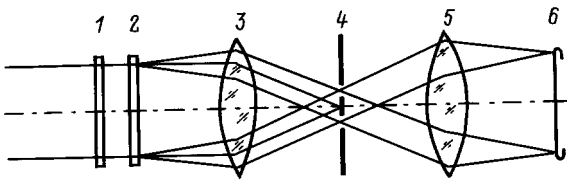


Рис. 1. Оптическая схема исследования волнового фронта, восстановленного голограммой фазового объекта.

При раздельной регистрации в плоскости *б* волн, описываемых выражениями (2) и (3), распределения освещенностей в картинах соответственно для +1-го и -1-го порядков имеют вид

$$I_{+1} = A_{+1}A_{+1}^* = \cos^2 \left[ \frac{2\pi x}{T} + \frac{2\pi L\varepsilon_x}{T} \right], \quad (4)$$

$$I_{-1} = A_{-1}A_{-1}^* = \cos^2 \left[ \frac{2\pi x}{T} - \frac{2\pi L\varepsilon_x}{T} \right]. \quad (5)$$

На рис. 2, *а, б* приведены картины искаженных изображений амплитудной решетки, наблюдаемой через голограмму шара на баллистической трассе. Картина рис. 2, *а* получена при использовании только +1-го порядка дифракции, а освещенность в ней описывается выражением (4). Другая картина (рис. 2, *б*) получена при использовании 1-го порядка и описывается выражением (5).

Из выражений (4), (5) и приведенных картин (рис. 2, *а, б*) видно, что отклонения штрихов из-за фазовых неоднородностей в изображении визуализирующей амплитудной решетки имеют различные знаки для одних и тех же точек объекта. Похожее свойство, но при образовании интерференционных картин ранее использовалось в голографической интерферометрии фазовых объектов для повышения чувствительности измерений при регистрации голограммы тремя пучками и получении муаровых картин [5]. Наложение теневых картин, образованных волнами, восстановленными в комплексно-сопряженных порядках, использовалось для компенсации неоднородностей подложки голограммы, а также повышения чувствительности измерений [6].

Различия в знаках отклонения изображений штрихов решетки может быть использовано для повышения чувствительности измерений углов  $\varepsilon_x$  при обработке картин вида (4), (5). Рассмотрим образование муаровых картин при наложении изображений искаженной решетки (4), (5) друг на друга. Наблюдение муаровых картин можно реализовать тремя различными способами.

1. Предположим, что в плоскости *б* (рис. 1) накладываются друг на друга волны вида (2), (3). При когерентном их сложении имеем распределение освещенности вида

$$I = (A_{+1} + A_{-1})(A_{+1}^* + A_{-1}^*). \quad (6)$$

2. Если регистрировать на фотоматериал картины (4), (5) последовательно, по методу двух экспозиций, то

амплитудное пропускание двухэкспозиционного снимка имеет вид

$$\tau = I^{-\gamma/2} = (I_{+1} + I_{-1})^{-\gamma/2}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — коэффициент контрастности фотоматериала.

3. Если получать раздельно снимки картин (4), (5), то результирующее амплитудное пропускание таких совмещенных снимков можно представить в виде

$$\tau = \tau_1\tau_2 = I_{+1}^{-\gamma/2} + I_{-1}^{-\gamma/2}. \quad (8)$$

Для всех трех случаев можно показать [7], что низкочастотная модуляция освещенности в (6), а также амплитудных пропусканий в (7) и (8) будут описываться одним и тем же членом вида

$$\cos \frac{\pi x}{T} \cos \left( \frac{2\pi L\varepsilon_x}{T} \right). \quad (9)$$

Высокочастотная составляющая, описываемая первым сомножителем, будет промодулирована медленно меняющейся функцией (второй сомножитель). Из (9) следует, что видность полос минимальна там, где

$$\frac{2\pi L\varepsilon_x}{T} = N\pi + \pi/2, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Следовательно, область низкой видности (муаровая полоса) есть геометрическое место точек, для которых величина  $\varepsilon_x$  постоянна. Из условия (10) следует рабочая формула для определения *x*-составляющей углов отклонения лучей

$$\varepsilon_x = \frac{T(N + 1/2)}{2L}. \quad (11)$$

При расшифровке картин вида (4), (5) и муаровых картин вида (9) видно, что одному и тому же изменению угла  $\varepsilon_x$  будут соответствовать различные изменения порядка полосы. Во втором случае изменение порядка полосы будет в два раза больше, чем в первом. Таким образом, чувствительность измерений во втором случае

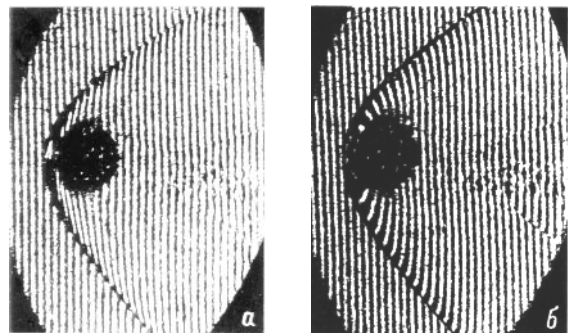
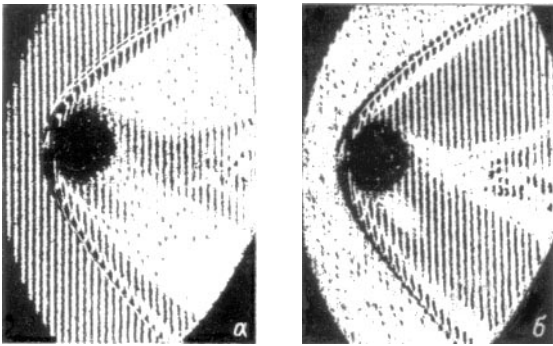


Рис. 2. Картины, визуализирующие распределение *x*-составляющей углов отклонения световых лучей, восстановленных голограммой шара на баллистической трассе, полученные при раздельной регистрации в +1-м (*а*) и -1-м (*б*) порядках дифракции.



**Рис. 3.** Муаровые картины, визуализирующие распределение  $x$ -составляющей углов отклонения световых лучей, восстановленных голограммой шара на баллистической трассе, полученные по различным методикам: *а* — при когерентном сложении волн, распространяющихся в  $+1$ -м и  $-1$ -м порядках дифракции; *б* — при совмещении и некогерентном освещении двух отдельных снимков, один из которых сдвинут вдоль оси  $X$  на величину, равную  $T/2$ .

в два раза выше, чем в случае, описанном в работе [4]. Увеличение чувствительности измерений связано с увеличением числа муаровых полос при наложении двух изображений решеток с взаимно противоположными смещениями штрихов.

На рис. 3, *а, б* приведены муаровые картины, полученные описанными способами. Первая картина (рис. 3, *а*) соответствует освещенности в плоскости регистрации *б* (рис. 1) при когерентном сложении волн вида (2), (3), т.е. получена при реализации первого способа. При реализации второго способа вид муаровой картины, образованной при освещении двухэкспозиционного снимка, в точности соответствует картине, приведенной на рис. 3, *а*. Реализация третьего способа в отличие от двух первых также позволяет регулировать настройку поля невозмущенной зоны фазового объекта. При точном совмещении двух отдельных снимков и освещении их как когерентным, так и некогерентным светом распределение освещенности в муаровой картине также будет соответствовать картине, приведенной на рис. 3, *а*. Однако при сдвиге одного снимка относительно другого вдоль оси  $X$  на величину, равную  $T/2$ , зоны минимальной видности в (9) заменятся на зоны максимальной видности, что может быть использовано для устранения неоднозначности при определении номера муаровой полосы. На рис. 3, *б* приведена муаровая картина, полученная третьим способом при освещении совмещенных снимков белым светом и настройке невозмущенного поля на светлую муаровую полосу.

Для определения  $y$ -составляющей углов отклонения лучей, восстановленных голограммой, т.е.  $\varepsilon_y$ , необходимо штрихи решетки  $I$  (рис. 1) ориентировать параллельно оси  $X$ , а при расшифровке муаровой картины использовать рабочую формулу (11).

Таким образом, наложение искаженных изображений амплитудной решетки, наблюдаемых в комплексно со-

пряженных порядках, восстановленных голограммой, позволяет получать муаровую картину с повышением чувствительности измерений.

В заключение хотелось бы выразить благодарность И.С. Зейликовичу за предоставленную голограмму шара на баллистической трассе.

### Список литературы

- [1] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [2] Зейликович И.С., Спорник Н.М. Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск: Университетское изд-во, 1988. 208 с.
- [3] Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1969. 490 с.
- [4] Буть А.И., Ляликов А.М. // ЖТФ. 1996.
- [5] Sevigny L. // Appl. Phys. Lett. 1967. Vol. 10. N 3. P. 78–79.
- [6] Зейликович И.С., Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 197–199.
- [7] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.