

07;12

## Количественный метод определения углов отклонения световых лучей, восстановленных с голограммы фазового объекта

© А.И. Буть, А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 31 июля 1995г.)

Предложен количественный метод исследования восстановленного волнового фронта с одиночной голограммы фазового объекта. Метод предназначен для исследования грубых неоднородностей в фазовых объектах. Приведены результаты экспериментальной апробации метода, подтверждающие его работоспособность.

### Введение

Для определения углов отклонения световых лучей неоднородностями фазового объекта при исследовании восстановленного деформированного волнового фронта с голограммы используются теневые методы и методы сдвиговой интерферометрии при малом сдвиге волновых фронтов [1,2].

При использовании теневых методов исследования восстановленного волнового фронта, у которых отклонение светового луча оптической неоднородностью определяется по величине изменения освещенности в теневой картине (метод ножа Фуко), на точность измерений оказывает влияние зависимость интенсивности восстановленного волнового фронта от видности голографических полос [3]. Для обеспечения достаточной точности измерений деформации волнового фронта необходимо использовать теневые методы, для которых изменение видности голографических полос по полю не влияет на точность измерений. Это — методы с визуализирующими диафрагмами в виде нити, щели, а также различные модификации теневого метода расфокусированных диафрагм [1–5]. Однако при исследовании грубых фазовых неоднородностей, отклоняющих зондирующие световые лучи на большие углы, необходимо увеличивать величину расфокусировки. Выполнение этого требования приводит к тому, что приходится сильно увеличивать световой диаметр фотографического объектива. Это влечет за собой снижение разрешающей силы и приводит к уменьшению коэффициента пропускания оптического прибора. Поэтому при исследовании сильных неоднородностей классическими теневыми методами используют методы расфокусированной решетки [6]. Суть метода заключается в том, что визуализирующая диафрагма ставится у изображения неоднородности или у самого предмета. Метод позволяет по смещению полосы в изображении решетки определить градиент оптической длины пути лучей в просвечиваемом объекте в направлении, перпендикулярном штрихам решетки.

Кроме того, большинство фазовых объектов имеет достаточно сложное распределение показателя преломления в пространстве с наличием границ с резким изменением показателя преломления. Например, обтекание различных тел в аэродинамических установках, аэробаллистических трассах и др. характеризуется наличием скачков плотности различной силы и конфигурации. Это приводит к тому, что полосы в изображении решетки на границе скачка имеют разрыв и при количественной обработке результирующих картин трудно установить соответствие полос в изображении решетки перед скачком и за ним.

В одном из методов установления соответствия полос при обработке сдвиговых интерферограмм с малой величиной сдвига волновых фронтов предлагается дополнительно использовать цветной теневой метод, который позволяет визуализировать зоны, отклоняющие зондирующие световые лучи на одинаковые углы [2]. По цветной теневой картине определяются координаты точек с нулевым углом отклонения, координаты этих точек переносятся на сдвиговые интерферограммы. Точки, полученные таким образом, являются пересечением продолжения полос в невозмущенной области перед скачком с соответствующими полосами в возмущенной области за скачком. Однако дополнительное использование цветного теневого метода существенно усложняет практическую реализацию эксперимента.

В данной работе разработан количественный метод исследования грубых фазовых неоднородностей, основанный на получении искаженного изображения вынесенной расфокусированной амплитудной решетки при восстановлении волнового фронта с голограммы. Предложенная методика также позволяет установить соответствие полос в изображении расфокусированной решетки для фазовых объектов с наличием границ с резким изменением показателя преломления.

В данной работе разработан количественный метод исследования грубых фазовых неоднородностей, основанный на получении искаженного изображения вынесенной расфокусированной амплитудной решетки при восстановлении волнового фронта с голограммы. Предложенная методика также позволяет установить соответствие полос в изображении расфокусированной решетки для фазовых объектов с наличием границ с резким изменением показателя преломления.

### 1. Описание метода

На рис. 1 представлена схема восстановления однократно экспонированной голограммы сфокусированного изображения фазового объекта и исследования восстановленного волнового фронта.

Использование голограммы сфокусированного изображения в случае наличия резко изменяющегося показателя преломления существенно, так как на границе скачка происходит дифракция объектной волны, которая в случае несфокусированности изображения вносит дополнительные шумы в результирующую картину при восстановлении голограммы.

В положение 1 (рис. 1) помещается голограмма, амплитудное пропускание которой описывается выражением

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

где  $x, y$  — координаты в плоскости голограммы,  $P$  — период интерференционных полос на голограмме;  $\Phi(x, y)$  — фазовые искажения деформированной объектной волны, записанной на голограмме.

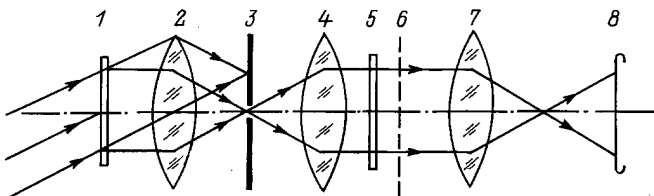
При освещении голограммы вида (1) под углом голографирования коллимированным пучком монохроматического света по нормали к ней в первом порядке дифракции восстановится волна с комплексной амплитудой

$$A(x, y) = a_0 \exp[i\Phi(x, y)], \quad (2)$$

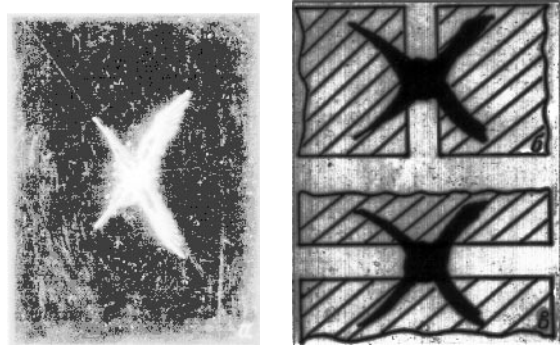
где  $a_0$  — действительная амплитуда восстановленной волны.

С помощью пространственного фильтра 3, установленного в фокальной плоскости объектива 2, волна вида (2) выделяется, а все остальные порядки дифракции диафрагмируются. В плоскости 6, оптически сопряженной с помощью объективов 2 и 4, строится изображение исследуемого фазового объекта. На расстоянии  $L$  от плоскости 6 в положение 5 помещается визуализирующая диафрагма в виде одномерной амплитудной решетки с периодом  $T$ . Так как при восстановлении голограммы используется источник монохроматического света, то ориентация штрихов решетки относительно голографических полос может быть любой.

При изучении обтеканий моделей одной из важных задач является определение как направления, так и



**Рис. 1.** Оптическая схема восстановления голограммы и исследования волнового фронта. 1 — однократно экспонированная голограмма сфокусированного изображения фазового объекта; 2, 4, 7 — объективы; 3 — пространственный фильтр, 5 — амплитудная решетка, 6 — плоскость восстановленного изображения фазового объекта, 8 — плоскость теневой картины.



**Рис. 2.** Дифракционный максимум первого порядка (а), полученный в фокальной плоскости объектива 2, и расположение пространственного фильтра для визуализации невозмущенных фазовым объектом зон в направлении оси  $OX$  (б) и оси  $OY$  (в).

величины углов отклонения. Классические теневые методы позволяют определять две проекции угла и, таким образом, найти сам угол. В данной работе, как и в классических теневых методах, для определения двух проекций угла  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  производятся две взаимно перпендикулярные настройки визуализирующей диафрагмы 5, так чтобы штрихи решетки были ориентированы вдоль осей  $OY$  и  $OX$  соответственно.

В плоскости 8, оптически сопряженной с помощью объектива 7, строится изображение фазового объекта на фоне амплитудной решетки 5. За счет наличия оптических неоднородностей период решетки в изображении изменится пропорционально углам отклонения. При настройке штрихов визуализирующей диафрагмы 5 в направлении оси  $OY$  визуализируются углы  $\varepsilon_x$ , а смещение штриха в изображении решетки определяется

$$\Delta x \sim L\varepsilon_x. \quad (3)$$

В случае настройки штрихов визуализирующей диафрагмы в направлении оси  $OX$  визуализируются углы  $\varepsilon_y$ , а смещение штриха в изображении изменится на величину

$$\Delta y \sim L\varepsilon_y. \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) углы отклонения световых лучей неоднородностями фазового объекта в направлении осей  $OX$  и  $OY$  определяются соответственно как

$$\varepsilon_x \sim \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x}, \quad \varepsilon_y \sim \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y}. \quad (5)$$

Из выражений (3) и (4) видно, что чувствительность метода зависит от величины расфокусировки  $L$  визуализирующей диафрагмы. Увеличение  $L$  приводит к увеличению чувствительности, однако при больших  $L$  начинает ухудшаться резкость в изображении штрихов.



**Рис. 3.** Теневая картина обтекания шара на баллистической трассе потоком воздуха, полученная по описанной схеме восстановления голограммы.

Освещенность в результирующей теневой картине для случая настройки штрихов визуализирующей диафрагмы  $5$  вдоль оси  $0Y$  будет иметь вид

$$I_x(x, y) \sim 1 + \cos \left[ \frac{2\pi x}{T_x} + \frac{2\pi I \varepsilon_x}{T_x} \right], \quad (6)$$

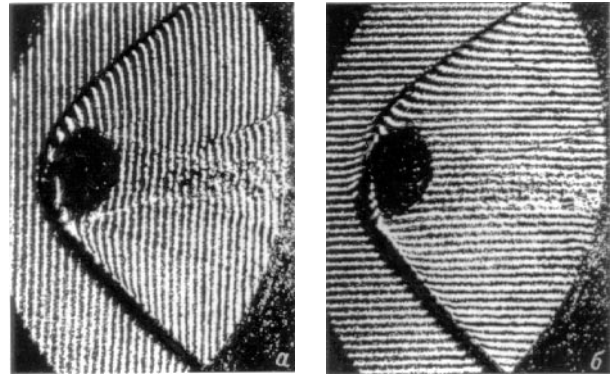
а в случае настройки штрихов диафрагмы  $5$  вдоль оси  $0X$

$$I_y(x, y) \sim 1 + \cos \left[ \frac{2\pi x}{T_y} + \frac{2\pi I \varepsilon_y}{T_y} \right], \quad (7)$$

где  $T_x$  и  $T_y$  — периоды в изображении штрихов при настройке визуализирующей диафрагмы вдоль осей  $0Y$  и  $0X$  соответственно.

При количественной обработке полученных таким образом теневых картин для нахождения углов отклонения  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$ , согласно (3) и (4), необходимо определить величины  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Однако, как было отмечено во Введении, не всегда удается установить соответствие изображение штриха решетки из-за разрыва на границе резкого изменения показателя преломления, а следовательно, точно определить  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . В этом случае может быть использовано то свойство, что в невозмущенной фазовым объектом зоне  $\varepsilon_x = 0$  и  $\varepsilon_y = 0$ , а следовательно, и смещение изображения штриха решетки  $\Delta x$  и  $\Delta y$  также равно нулю. Для установления соответствия изображения штриха решетки в возмущенной зоне за разрывом необходимо визуализировать зоны, для которых  $\varepsilon_x = 0$  и  $\varepsilon_y = 0$ . Поэтому на продлении за разрыв  $m$ -й полосы невозмущенной зоны будет находиться та же  $m$ -я полоса в возмущенной зоне.

Для реализации этого способа в плоскости  $3$  (рис. 1) помещается пространственный фильтр, который диафрагмирует высшие пространственные частоты дифракционного максимума первого порядка, представленного на рис. 2, *а*. Фильтр выполнен в виде щели и для визуализации углов в направлении

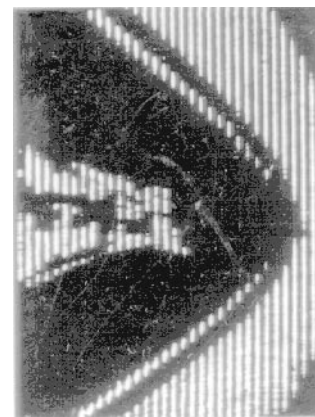


**Рис. 4.** Теневые картины, характеризующие распределение углов отклонения световых лучей в направлении оси  $0X$  (*а*) и в направлении оси  $0Y$  (*б*).

оси  $0X$  устанавливается как показано на рис. 2, *б*, а для визуализации углов в направлении оси  $0Y$  — на рис. 2, *в*. Таким образом, в результирующей картине вырезаются зоны, невозмущенные исследуемым фазовыми объектом, для которых  $\Delta x = 0$  и  $\Delta y = 0$ .

## 2. Экспериментальная апробация

Разработанный количественный метод исследования восстановленного с голограммы волнового фронта был использован для визуализации воздушных потоков при обтекании шара на баллистической трассе. В качестве визуализирующей диафрагмы использовалась решетка с периодом  $T \sim 0.3$  мм, записанная интерференционным способом на фотопленку. Величина расфокусировки  $L$  визуализирующей диафрагмы для всех приводимых картин составляет 16 мм. На рис. 3 представлена теневая картина, полученная по схеме рис. 1, где пространственным фильтром  $3$  выделялся нулевой порядок дифракции волн на голограмме. Так как в нулевом порядке восста-



**Рис. 5.** Теневая картина, визуализирующая зоны, невозмущенные фазовым объектом в направлении оси  $0X$ .

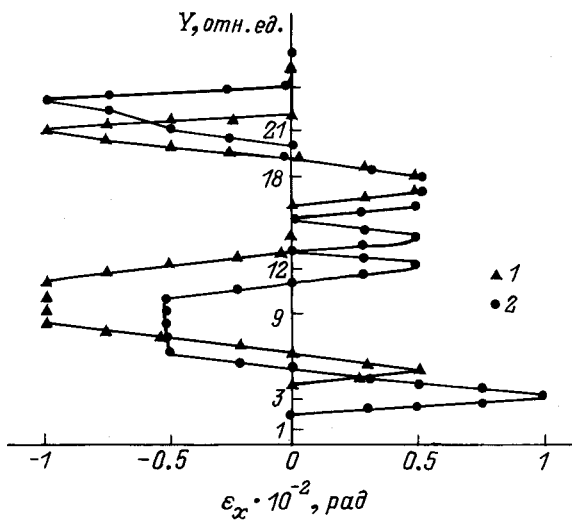


Рис. 6. Распределения  $\varepsilon_x$  вдоль оси  $OY$ . Расстояние от шара: 1 —  $R$ , 2 —  $2R$ .

навливаются не деформированный волновой фронт, то, как видно из приведенной картины, изображения штрихов решетки искажены и представляют собой эквидистантные полосы. Это указывает на то, что в данном методе на результирующую картину влияют только фазовые искажения, вносимые неоднородностями восстановленного фазового объекта.

Теневые картины, полученные по разработанной методике, визуализирующие две проекции углов отклонения световых лучей, представлены на рис. 4, а, б. Для установления соответствия полос в зоне перед ударной волной и за ней при количественной обработке картины (рис. 4, а) была получена теневая картина (рис. 5), визуализирующая зоны, не возмущенные фазовым объектом, для которых в направлении оси  $OX$   $\Delta x = 0$ . На рис. 6 приведены распределения  $\varepsilon_x$  вдоль сечений, параллельных оси  $Y$ , расположенных на расстоянии  $R$  и  $2R$  от шара, где  $R$  — радиус шара.

## Заключение

Рассмотренный в данной работе количественный метод позволяет исследовать грубые фазовые неоднородности, которые составляют большой класс исследуемых фазовых объектов. Использование в комплексе метода установления соответствия полос позволяет расширить класс исследуемых объектов и решать более сложные задачи количественной обработки сложных фазовых объектов с наличием границ резкого изменения показателя преломления, что подтверждают результаты эксперимента. Предложенный метод установления соответствия полос не требует дополнительного изменения схемы визуализации, что существенно упрощает эксперимент. Кроме этого, использование голограммы, зарегистрированной при

нелинейных условиях, позволяет на стадии восстановления регулировать чувствительность метода [1], которая при использовании голограммы, зарегистрированной при линейных условиях, ограничена периодом визуализирующей амплитудной решетки и величиной ее расфокусировки.

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., Картазаев С.А., Спорник Н.М. // Опт. и спектр. 1979. Т. 47. Вып. 6. С. 1178–1181.
- [3] Зейликович И.С., Спорник Н.М. Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск, 1988. 208 с.
- [4] Зейликович И.С., Ляликов А.М., Спорник Н.М. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. Вып. 3. С. 659–663.
- [5] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1995. Т. 78. Вып. 3. С. 524–528.
- [6] Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1969. 490 с.