

УДК 535.42

## О РОЛИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В МЕТОДЕ РАСФОКУСИРОВАННЫХ ДИАФРАГМ

Кособурд Т. П.

Учет дифракции на визуализирующей диафрагме позволяет оценить предельную чувствительность оптической схемы и найти условия справедливости известной геометрооптической методики расшифровки тенеграм. Эти условия определяются как параметрами самой схемы, так и измеряемым фазовым профилем и могут служить основой для расчета теневой установки.

Метод расфокусированных диафрагм осуществляется по одной из схем, изображенных на рисунке. Исследуемый прозрачный объект освещается параллельным пучком когерентного света с длиной волны  $\lambda$ . Между объектом и его изображением, формируемым линзой с фокусным расстоянием  $F$ , устанавливается диафрагма в виде решетки, нити, системы непрозрачных точек и т. п. [1].

При анализе изображений пренебрегают дифракцией на диафрагме. Однако на практике дифракционные явления оказывают существенное влияние на наблюдаемую картину. Так, например, при использовании решетки в качестве визуализирующей диафрагмы могут образоваться так называемые картины «обратного» типа [1] (т. е. дифракционные изображения между плоскостями саморепродукции) в пределах всего поля или какой-то части исследуемой неоднородности даже тогда, когда разделение дифракционных порядков мало.

Рассмотрим формирование изображений с учетом дифракции на произвольной диафрагме.

Пусть исследуемый объект модулирует падающий на него параллельный пучок когерентного света с длиной волны  $\lambda$  по закону

$$E_0(x) = \exp[i\varphi(x)], \quad (1)$$

а визуализирующая диафрагма имеет прозрачность  $\tau(x)$ , пространственный спектр которой

$$g(u) = \int dx \cdot \exp[iux] \cdot \tau(x). \quad (2)$$

Тогда точное выражение для поля в сопряженной объекту плоскости можно записать в виде

$$E(x) = A(x) \int du g(u) E_0[M(x - \Omega u)] \exp[i(\beta u^2 + K u M x)], \quad (3)$$

где  $M = a/b$  — масштаб изображения,  $k = 2\pi/\lambda$ ,

$$\left. \begin{aligned} \Omega = c/kM, \beta = c/2k, K = 1, A(x) = 2 \sqrt{\frac{(a-c)c}{ka}} \exp\left[i \frac{kMx^2}{2F}\right] \quad (\text{для рисунка } a), \\ \Omega = c/k, \beta = c\Delta/2kF, K = \Delta/F, A(x) = 2 \sqrt{\frac{c(F-\Delta)}{kb}} \exp\left[i \frac{kMx^2}{2F}\right] \quad (\text{для рисунка } б) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(смысл величин  $a, b, c, \Delta$  ясен из рисунков).

Воспользуемся разложением функции  $\varphi[M(x - \Omega u)]$  в ряд Тейлора

$$\varphi[M(x - \Omega u)] = \varphi(Mx) - \varphi'_{Mx} M\Omega u + \frac{1}{2} (M\Omega u)^2 \varphi''_{Mx} - \dots \quad (5)$$

При выполнении условий

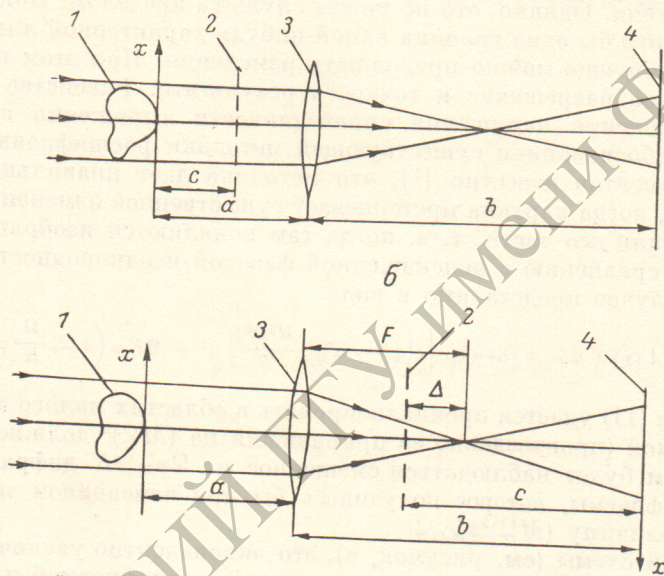
$$M\Omega u_{\max} < 2\delta, \quad (6)$$

$$(M\Omega u_{\max})^2 \varphi''_{Mx} < \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

(где  $\delta$  — характерный масштаб изменения фазы,  $u_{\max}$  — полуширина спектра функции прозрачности диафрагмы  $\tau(x)$ ) в (5) можно ограничиться первыми двумя членами. Подставив (5) в (3), получим следующее выражение для поля

$$E(x) = A(x) \int du \cdot g(u) \exp\left\{i\left[\beta u^2 + Ku\left(x - \frac{\Omega}{K} \varphi'_{Mx}\right)\right]\right\} = T\left[M\left(x - \frac{\Omega}{K} \varphi'_{Mx}\right)\right], \quad (8)$$

где  $T(Mx)$  — изображение диафрагмы в отсутствие фазового объекта.



Варианты оптической схемы визуализации методом расфокусированных диафрагм: 1 — фазовый объект, 2 — диафрагма, 3 — линза, 4 — плоскость изображения.

Выражение (8) означает, что без неоднородности и в областях с  $\varphi' = 0$  будет наблюдаться неискаженное дифракционное изображение диафрагмы, каждая точка которой там, где  $\varphi' \neq 0$ , будет смещаться на величину, пропорциональную производной фазы.

Из (8) следует, что при выполнении условий (6), (7) методика измерения градиента фазы не будет отличаться от предсказанной геометрической оптикой [1] независимо от вида диафрагмы и характера ее изображения. При расшифровке следят за сдвигом  $q$  характерных линий в дифракционной картине. Если, например, для визуализации используется решетка, то этих линий при некоторых ее положениях может оказаться больше, чем в ее резком изображении, поэтому будет выше и пространственное разрешение.

Пространственное разрешение можно улучшить путем сравнения результатов фотометрирования изображений диаграммы с объектом и без него. Расшифровка картины будет при этом наиболее простой для диафрагмы с синусоидальной прозрачностью [2].

Полученные на основе учета дифракции условия (6), (7) применимости известной геометрической методики расшифровки тенегрмм могут быть использованы для выбора параметров оптической схемы и оценки ее предельной

чувствительности. Чувствительность  $H = dq/d\varphi'$  при произвольном расположении элементов схемы равна

$$H = \Omega/K. \quad (9)$$

При малом отношении  $\Delta/F$  чувствительность второй схемы (рисунок, б), как это видно из (4), (9), может быть значительно больше по сравнению с первой схемой (см. рисунок, а).

Предельную чувствительность, при которой еще можно пользоваться существующей методикой измерений, исходя из (6), (9), можно оценить из выражения

$$H_{\text{пред}} = \frac{2\delta}{MKu_{\text{max}}}. \quad (10)$$

Здесь  $H_{\text{пред}}$  зависит от характерного масштаба  $\delta$  изменения фазы  $\varphi(x)$ , ширины спектра диафрагмы, масштаба изображения (и отношения  $\Delta/F$  во второй схеме).

Это значение  $H_{\text{пред}}$  отличается от приводимого в [1], так как получено из других соображений. В [1] предполагается, что предельная чувствительность соответствует такому положению диафрагмы, при котором в поле зрения попадает всего две тени. Однако это не может служить пределом. Пока в поле зрения попадает хотя бы одна граница какой-нибудь характерной линии в изображении диафрагмы еще можно продолжать измерения. При этом падает только пространственное разрешение и точность результата. Равенство (10) получается из соображения нарушения справедливости выражения для поля (8), являющегося обоснованием существующей методики расшифровки тенеграмм.

Из экспериментов известно [1], что методика дает правильный результат и в том случае, когда картина претерпевает существенное изменение в пределах всего объекта или его части, т. е. когда там появляются изображения «обратного» типа по сравнению с неискаженной фазовой неоднородностью областью. Поле в этом случае представимо в виде

$$E(x) = A(x) \int du \cdot g(u) \exp \left\{ i \left[ \left( \beta + \varphi''_{Mx} \frac{M^2 \Omega^2}{2} \right) u^2 + MKu \left( x - \frac{\Omega}{K} \varphi'_{Mx} \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

Выражение (11) удастся проанализировать в областях малого изменения второй производной (произведение ее приращения на  $(M\Omega)^2$  должно быть меньше  $\pi/2$ ). При этом будет наблюдаться смещенное на  $\Omega \varphi'_{Mx}/K$  дифракционное изображение диафрагмы, которое получилось бы при измененном значении параметра  $\beta$  на величину  $(M\Omega)^2 \varphi''_{Mx}/2$ .

Для первой схемы (см. рисунок, а), это эквивалентно увеличению расстояния между диафрагмой и объектом, для второй — диафрагмой и изображением при сохранении отношения  $\Delta/F$ .

Рассмотрим подробнее этот эффект на примере решетки с периодом  $\Lambda$ . Для нее (11) перейдет в выражение

$$E(x) = A(x) \sum_n g_n \exp [iBn^2] \exp \left[ i \frac{2n\pi K}{\Lambda} \left( x - \frac{\Omega}{K} \varphi'_{Mx} \right) \right], \quad (12)$$

где

$$B = \frac{4\pi^2}{\Lambda^2} \left[ \beta + \frac{1}{2} M^2 \Omega^2 \varphi''_{Mx} \right].$$

В пределах изображения в зависимости от значения второй производной (и параметра  $\beta$ ) могут возникать картины разного типа. В той части, где  $B = 2m\pi$  ( $m$  — целое), будет наблюдаться резкое изображение решетки [3]. Там, где  $B = (2m+1)\pi$ , поменяются местами темные и светлые штрихи [из-за сдвига на  $\Lambda/2$ ]. При промежуточных значениях параметра  $B$  возникнут более сложные дифракционные картины, соответствующие изображениям решетки между плоскостями саморепродукции.

Отсюда ясно, что хотя методика определения  $\varphi'$  может оставаться прежней, но при измерении следует учитывать тип наблюдаемой картины и отмерять сдвиг линий от их положения в неискаженном изображении именно такого типа,

а не обязательно того, который наблюдается вне пределов исследуемого объекта. Так, например, если в плоскости визуализации происходит саморепродукция решетки ( $B=2m\pi$ ), а на фоне части неоднородности — ее полное «обращение» ( $B=(2m+1)\pi$ ), то сдвиг центров темных полос здесь нужно отмерять от центров соответствующих светлых полос в изображении диафрагмы в отсутствие неоднородности.

Итак, учет дифракции на диафрагме позволяет оценить предельную чувствительность оптической схемы, найти условия применимости геометрооптической методики, обосновать ее применимость в том случае, когда дифракцией пренебречь нельзя, получить выражения для поля, которые в принципе можно расшифровывать на основе фотометрирования.

#### Литература

- [1] Васильев Л. А. Теневые методы. М., 1968.
- [2] Кособурд Т. П., Маркус Ф. А. — Опт. и спектр., 1982, т. 53, в. 5, с. 767.
- [3] Денисюк Ю. Н., Рамишвили Н. М., Чавчанидзе Д. В. — Опт. и спектр., 1971, т. 30, в. 6, с. 1130.

Поступило в Редакцию 22 февраля 1984 г.