

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Aleksoff. Time Average Holography Extended.— Appl. Phys. Lett., 1969, v. 14, № 1.
2. Б. А. Белогородский, М. М. Бутусов, Ю. Г. Туркевич. Голографический метод исследования вибраций с модулированным по фазе опорным пучком.— Акустический журнал, 1971, XVII, № 3.
3. Б. А. Белогородский, М. М. Бутусов, Ю. Г. Туркевич. Голографические методы исследования высокочастотных вибраций.— Автометрия, 1972, № 1.
4. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М., «Наука», 1970.
5. J. N. Latta. The Bleaching of Holographic Diffraction Gratings.— Appl. Opt., 1970, v. 7, № 12.
6. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
7. Ю. И. Островский. Голография. Л., «Наука», 1970.

*Поступила в редакцию 14 октября 1971 г.*

УДК 621.378.9 : 778.4

**Ю. Н. СОЛОДКИН**

(Новосибирск)

### ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР КАК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР

Методы голографической интерферометрии для исследования деформаций и вибраций интенсивно развиваются. При практическом использовании этих методов важным является вопрос о метрологических характеристиках голографических интерферометров. К таким характеристикам прежде всего относятся погрешность и пределы измерения, чувствительность и порог чувствительности. Данная работа представляет собой попытку проанализировать метрологические характеристики голографических интерферометров на основе некоторых результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Известно соотношение [1]:

$$\vec{d}(\vec{r}_0 + \vec{r}_n) = N\lambda, \quad (1)$$

где  $\vec{d}$  — вектор смещения точки поверхности объекта;  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}_n$  — соответственно единичные векторы освещения и наблюдения;  $N$  — число интерференционных полос от полосы нулевого порядка до рассматриваемой точки;  $\lambda$  — длина волны (рис. 1).

Выражение (1) позволяет определить проекцию вектора смещения  $\vec{d}$  на биссектрису угла  $\widehat{r_0 r_n} = \varphi$ . Для полного определения  $\vec{d}$  обычно решают систему из трех уравнений вида (1), отличающихся друг от

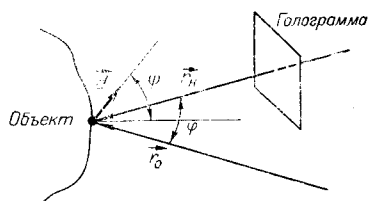


Рис. 1.

друга направлениями наблюдения  $\vec{r}_n$ . В этом случае либо экспонируются три голограммы [2], либо через одну голограмму объект наблюдается с трех направлений [3]. Не останавливаясь подробно на методах расшифровки, отметим только, что любой из них определяет смещение  $\vec{d}$  с точностью до знака.

Из уравнения (1) следует, что име-

ются два источника погрешностей: 1) неточность определения направлений  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}_n$  и 2) неточность определения числа полос  $N$ . Вычисляя относительную погрешность измерения проекции  $\vec{d}$  по формуле

$$\delta d_\varphi = \frac{1}{d_\varphi} \left( \left| \frac{\partial d_\varphi}{\partial \varphi} \right| \Delta \varphi + \left| \frac{\partial d_\varphi}{\partial N} \right| \Delta N \right), \quad (2)$$

где  $d_\varphi$  — проекция вектора  $\vec{d}$ , а  $\Delta \varphi$  и  $\Delta N$  — соответственно абсолютные погрешности определения  $\varphi$  и  $N$ , получим

$$\delta d_\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \Delta \varphi + \frac{\Delta N}{N}. \quad (3)$$

Анализ первой составляющей погрешности не вызывает трудностей. Она изменяется пропорционально  $\operatorname{tg} \varphi/2$ . Если направления освещения и наблюдения совпадают ( $\varphi=0$ ), то эта составляющая равна нулю. При углах, близких к  $\pi$ , погрешность резко возрастает. Если  $\Delta \varphi=0,02$  ( $\sim 1^\circ$ ) и  $\varphi=\pi/2$ , то погрешность измерения соответствующей проекции от неточности определения угла  $\varphi$  составляет 1%. Этот пример показывает, что при достаточно больших углах  $\varphi$  данную погрешность надо учитывать. Это тем более важно, если учесть, что в методах расшифровки [2, 3] изменение направлений наблюдения должно быть значительным, чтобы стало заметным изменение интерференционной картины.

Второе слагаемое выражения (3) представляет собой относительную погрешность определения числа интерференционных полос. Эта погрешность определяется наличием шума в изображении диффузных объектов при когерентном освещении. Природа и характеристики таких шумов рассматриваются, например, в [4—6]. Мерой качества изображения служит отношение средней интенсивности сигнала к средней интенсивности шума  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш$ . Значение  $\bar{I}_ш$  определяется искажениями, вносимыми голограммой в восстановленное изображение, а также разрешающей способностью оптической системы наблюдения.

В [5] показано, что относительное среднеквадратичное отклонение интенсивности в голографическом изображении диффузных объектов определяется следующим выражением:

$$\sigma^2 = \left( \frac{\bar{I}_ш}{\bar{I}_c} \right)^2 = \frac{A}{N\lambda^2 l^2} F_1^2(\xi) + F_2^2(\xi), \quad (4)$$

где  $\xi = \pi A d / \lambda l$ ;  $A$  и  $d$  — соответственно линейный размер голограммы и считывающего отверстия;  $l$  — расстояние от объекта до голограммы;  $\bar{N}$  — средняя плотность рассеивающих центров на поверхности объекта;  $F_1(\xi)$  и  $F_2(\xi)$  — функции, графики которых приведены на рис. 2. Первая составляющая шумов в выражении (4) связана с флуктуациями плотности рассеивающих центров, а вторая — со случайностью их расположения по глубине объекта. Так как обычно  $\bar{N} \gg A^2/\lambda^2 l^2$ , то значением первой составляющей можно пренебречь. Кроме того, если вычислить «среднее» значение  $\xi$  ( $A=5$  см;  $d=100$  мкм;  $\lambda=0,63$  мкм;  $l=20$  см), получим  $\xi \approx 125$ , а из [5] следует, что при  $\xi > 20$  можно считать  $F_2^2(\xi) = \lambda^2 l^2 / A^2 d^2$ . В этом случае отношение сигнал/шум равно

$$\bar{I}_c/\bar{I}_ш = A d / \lambda l. \quad (5)$$

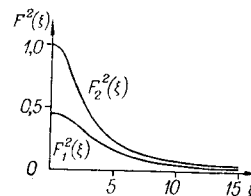


Рис. 2.

Для указанных выше параметров  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш \approx 40$ . Вследствие нелинейности  $T_a - E$  характеристики фотоэмульсии и ее зернистости уровень шумов возрастает, как получено в [5], в 2—3 раза, т. е.  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш \approx 15 \div 20$ .

В [6] исследовались зависимости величины  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш$  от отношения интенсивности опорной волны к интенсивности объектной  $K$ , а также от коэффициента пропускания голограммы по амплитуде  $T_a$ . Из полученных результатов следует, что максимум отношения сигнал/шум мало меняется при изменении параметра  $K$ , но существенно зависит от значения коэффициента пропускания  $T_a$ . При оптимальных условиях записи голограммы ( $K \approx 1$  и голограмма экспонируется и обрабатывается так, чтобы  $T_a \approx 0,7$ )  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш \approx 30 \div 40$ . Если учесть, что в [6]  $l = 5$  см, то совпадение результатов, полученных в [5 и 6], следует считать достаточно хорошим.

Нас интересует не само значение  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш$ , а какова будет при этом погрешность определения числа интерференционных полос  $\Delta N$ . Учитывая, что интенсивность в интерферограмме меняется по гармоническому закону и имеет минимальный градиент в максимуме функции, и принимая за одну полосу период изменения гармоника, получим

$$\Delta N = \frac{1}{\pi} \arccos(1 - \bar{I}_ш/\bar{I}_c). \quad (6)$$

При  $\bar{I}_c/\bar{I}_ш = 30 \div 40$  имеем  $\Delta N = 0,05 \div 0,07$  ширины полосы. При малых измеряемых смещениях, когда  $N$  мало, погрешность может быть очень высокой. В приведении к одной полосе относительная погрешность измерения, обусловленная шумами, вносимыми голограммой, составляет примерно 5—7%.

Конечное разрешение оптической системы наблюдения также приводит к возникновению изображения с зернистой структурой или авантюриновыми точками. Ширина импульсного отклика оптической системы определяет ту область в окрестностях изображаемой точки, которая вносит вклад в амплитуду изображения этой точки. Как уже отмечалось, рассеивающие точки случайно расположены по глубине объекта, и относительная фаза рассеянной волны является случайной величиной, поэтому суммарная амплитуда может принимать любое значение от нуля до суммы модулей слагаемых. Зависимость значения интенсивности в заданной точке от интенсивности в соседних точках определяется автокорреляционной функцией

$$K(u, v) = \iint I(x, y) I(x+u, y+v) dudv. \quad (7)$$

При увеличении расстояния между точками функция автокорреляции стремится к нулю. Естественно размером зерна считать ширину основного максимума автокорреляционной функции. Из природы зернистости вытекает, что если размер неоднородностей диффузных поверхностей меньше разрешаемого оптической системой элемента поверхности, то пространственная структура зернистости не зависит от степени шероховатости поверхности и полностью определяется импульсным откликом оптической системы. Практически для большинства диффузных объектов выполняется это условие.

В [4] получено выражение для автокорреляционной функции интенсивности (7), однако оно довольно громоздко и неудобно для расчетов. Воспользуемся экспериментальными данными. Нами исследовались параметры зернистой структуры изображения диффузной поверхности, полученного с помощью объектива «Гелиос-44». Сканирование осуществлялось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-68 с диаметром сканирующего отверстия  $\approx 5$  мкм. Выходной сигнал ФЭУ после усиления поступал на вход цифровой системы обработки данных «Didak-800»,

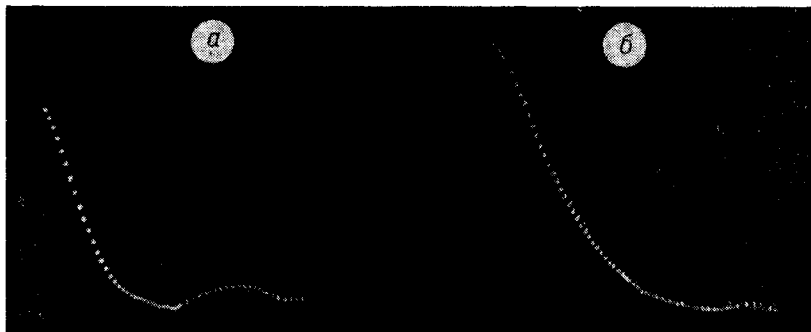


Рис. 3.

которая вычисляла автокорреляционные функции интенсивности. На рис. 3, а, б в качестве примера приведены два графика этих функций, полученных на экране выходной трубки системы.

На рис. 4 показаны кривые, определяющие зависимость ширины основного пика автокорреляционной функции или, что то же самое, диаметра зерна от величины относительного отверстия объектива. Нижняя кривая является результатом теоретического расчета диаметра зерна без учета aberrаций объектива. Кривая 2 отображает результаты экспериментального исследования размера зерна вблизи главной оптической оси объектива, где его разрешение составляет 45 1/мм. Как следует из сравнения кривых 1 и 2, aberrации объектива существенно влияют на размеры зерна. При относительном отверстии 2 размер зерна больше расчетного примерно в 3—4 раза. Размер зерна в стороне от главной оси объектива увеличивается. Кривая 3 определяет размер зерна на расстоянии 15 мм от главной оптической оси, где разрешение объектива падает до 30 1/мм.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что средний размер зерна, как и следовало ожидать, равен приблизительно разрешаемому объективом элементу. В указанном примере диаметр зерна составляет 20—50 мкм. Очевидно, что отношение сигнал/шум, которое интересует нас для определения погрешности измерения, будет зависеть от размеров сканирующей диафрагмы, с помощью которой считывается голографическая интерферограмма. При увеличении сканирующего отверстия за счет интегрирования уменьшается уровень шумов. В то же время диаметр отверстия должен быть достаточно мал, чтобы не исказить сигнала. Таким образом, имеет место оптимальное значение диаметра сканирующего отверстия, при котором получается максимальное отношение сигнал/шум.

В общем виде получение оптимального значения сканирующей диафрагмы связано со значительными трудностями. Если предположить, что сканируется изображение однородной диффузной поверхности и диаметр сканирующего отверстия  $D_{ск}$  много больше диаметра зерна  $D_з$ , то можно показать, что

$$\bar{I}_c / \bar{I}_ш \approx 2D_{ск} / D_з. \quad (8)$$

Если  $D_з \approx 40$  мкм, а  $D_{ск} \approx 400$  мкм, то получим  $\bar{I}_c / \bar{I}_ш \approx 20$ . Подставляя это отношение в (6), получим, что  $\Delta N \approx 0,1$  ширины полосы, что соответствует при  $N=1$  погрешности измерения 10%. Отметим, что предыдущие рассуждения справедливы, когда диаметр сканирующего отверстия много меньше ширины

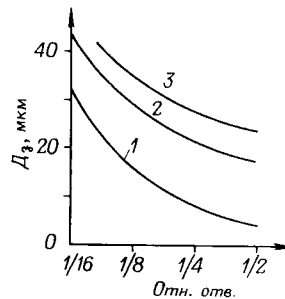


Рис. 4.

полосы. При большой пространственной частоте полос погрешность определится не отношением сигнал/шум, а конечными размерами сканирующего отверстия.

Таким образом, относительная погрешность измерения проекции вектора смещения на биссектрису угла между направлением освещения и наблюдения, обусловленная неточностью определения числа интерференционных полос, зависит от шумов голограммы, полосы пропускающей оптической системы наблюдения и размеров считывающего отверстия. Она обратно пропорциональна числу полос  $N$  и при  $N=1$  составляет примерно 5—10%. Отметим, что при оценке погрешности мы не рассматривали возможность предварительной обработки сигнала с целью увеличения отношения сигнал/шум.

Перейдем к вопросу о пределах измерения голографических интерферометров. Верхний предел измерения определяется максимальной пространственной частотой зернистой структуры изображения, которая составляет, как было показано, 20—50 лин/мм. При цене полосы  $\lambda/2$  максимальный градиент деформации, который может быть измерен,  $(10 \div 25) \lambda$  мкм/мм. Для  $\lambda=0,63$  мкм верхний предел измерения 6—15 мкм/мм. Порог чувствительности голографического интерферометра определяется минимальной долей интерференционной полосы, которая оказывается различимой. Если цена полосы по-прежнему  $\lambda/2$ , а  $\Delta N \approx 0,1$ , то порог чувствительности составляет при  $\lambda=0,63$  мкм примерно 0,03 мкм.

Чувствительность голографического интерферометра определим как отношение  $S=N/|\vec{d}|$ . Тогда из (1) следует, что

$$S = \frac{N}{|\vec{d}|} = \frac{2}{\lambda} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \psi, \quad (9)$$

где  $\psi$  — угол между вектором  $\vec{d}$  и биссектрисой угла  $\varphi$ . Проанализируем выражение (9). Чувствительность обратно пропорциональна длине волны и прямо пропорциональна  $\cos \varphi/2$  и  $\cos \psi$ . Если  $\psi \approx \pi/2$ , то чувствительность близка к нулю, и даже большие смещения не вызывают появления интерференционных полос. Изменяя угол  $\psi$ , можно подбирать чувствительность, исходя из условий эксперимента. На рис. 5 изображен рельеф, показывающий зависимость чувствительности от соответствующих углов в голографическом интерферометре.

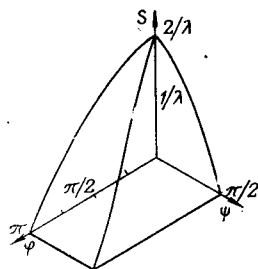


Рис. 5.

Таким образом, в данной работе рассмотрены основные метрологические характеристики голографических интерферометров: погрешность и пределы измерения, чувствительность и порог чувствительности. Полученные результаты позволяют оценить возможности голографических интерферометров, однако они в значительной степени являются качественными.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. E. Sollid. Holographic Interferometry Applied to Measurement of Small Static Displacements of Diffusely Reflecting surfaces.— Applied Optics, 1969, v. 8, № 8.
2. А. Е. Епнос. Measurement of In-plane Surface Strain by Hologram Interferometry.— Journal of Scientific Instruments, 1968, ser. 2, v. 1, № 5.
3. Е. Б. Александров, А. М. Бонч-Бруевич. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники. ЖТФ, 1967, т. 37, № 2.
4. L. H. Eplloe. Noise-Like Structure in the Image of Diffusely Reflecting Objects in Coherent Illumination.— The Bell System Technical Journal, September 1967.
5. И. С. Стромиллов. Оценка качества голографических изображений диффузно отражающих объектов с учетом разрешающей способности регистрирующей аппаратуры.— Квантовая электроника, 1971, № 5.
6. Wai-Hon Lee, M. O. Greer. Noise Characteristics of Photographic Emulsions Used for Holography.— J. Opt. Soc. Amer., 1971, v. 61, № 3.

Поступила в редакцию 9 марта 1973 г.