

А. Н. ГРИШАНОВ, С. Т. ДЕ, Е. Н. ДЕНЕЖКИН, В. А. ХАНДОГИН
(Новосибирск)

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ НА ОСНОВЕ МУАРОВЫХ ЭФФЕКТОВ

Муаровый эффект представляет собой интерференцию интенсивностей двух систем линий, в результате которой появляются две системы муаровых полос [1]. Цифровая реализация этого явления может быть использована для первичной обработки интерферограмм, имеющих большое или малое число интерференционных полос.

Муаровые эффекты могут возникать, например, при умножении [2] или сложении [3] черно-белых изображений и при цветовом смещении двух разноцветных изображений [4]. В статье рассматривается первый вариант, поскольку в нем муаровые полосы отражаются в спектре результирующей полосатой картины.

Предположим, что интерферограммы зарегистрированы на фотоносителе в пределах линейного участка его характеристики. Тогда плотность почернения интерференционных картин пропорциональна освещенности восстановленного изображения. Ограничимся случаем двухэкспозиционных голограмм (об особенностях муаровых картин при других способах записи голограмм см. [2]). Таким образом, почернение интерферограммы аппроксимируется функцией вида

$$I(\bar{x}) = I_0(\bar{x}) (1 + V(\bar{x}) \cos \varphi(\bar{x})), \quad (1)$$

где $I(\bar{x})$ — освещенность изображения, восстановленного с двухэкспозиционной голограммы; $I_0(\bar{x})$ — изображение исследуемого объекта; $V(\bar{x})$, $\varphi(\bar{x})$ — контраст и фаза интерференционных полос; $\bar{x} = (x, y)$ — координаты текущей точки интерферограммы. Подчеркнем две наиболее важные с точки зрения цифровой обработки особенности голографических интерферограмм.

Наличие фона $I_0(\bar{x})$ приводит к низкочастотным (изображение голографируемого объекта) и высокочастотным (спекл-шум) неоднородностям почернения интерферограмм. Указанные неоднородности эффективно подавляются стандартными фильтрами высоких и низких частот [5]. Учитывая это, будем считать, что средний уровень почернения постоянен в области интерферограммы, т. е.

$$I_0(\bar{x}) = I_0 = \text{const.} \quad (2)$$

Предположение о линейной регистрации интенсивности восстановленного изображения означает, что профиль интерференционных полос точно известен (в данном случае это косинусоида (1)). Указанная особенность позволяет применять алгоритмы отсчета дробных долей интерференционных полос. Регистрация интерферограмм на технических фотопленках существенно искажает идеальный косинусоидальный профиль полос, что ограничивает применимость тех алгоритмов, в которых используется цифровая фильтрация муаровых картин.

Назовем муарограммой результат преобразования распределений пропускания двух (и более) интерферограмм с помощью рассмотренных ниже преобразований.

Простейший вид муарограммы M_s получается при умножении пропусканий двух интерферограмм $I_1(\bar{x})$ и $I_2(\bar{x})$:

$$M_s = I_1 I_2 = I_0^2 \left[1 + V_1 \cos \varphi_1 + V_2 \cos \varphi_2 + \frac{V_1 V_2}{2} (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \right], \quad (3)$$

где муаровым полосам соответствуют два последних слагаемых. Одно из них представляет коротковолновые осцилляции пропускания муарограммы, не заметные на фоне исходных растров (1); другое характеризует более длинноволновые по сравнению с (1) изменения почернения, которые при визуальном наблюдении (или фоторегистрации) и воспринимаются как муаровые полосы. Подчеркнем, что последние в общем случае не являются линиями локальных экстремумов почернения, но тем не менее отчетливо наблюдаются и надежно регистрируются благодаря тому, что отражаются в спектре муарограммы (3).

При первичной обработке голографических интерферограмм поля $\varphi_k(\bar{x})$ могут соответствовать различным либо одному и тому же образцу. В первом случае муарограмма позволяет количественно оценить отличия в поведении сравниваемых объектов [2, 6], во втором — визуализирует поля производных фазы $\varphi(\bar{x})$. При этом поля $\varphi_k(\bar{x})$ представляют одно и то же поле $\varphi(\bar{x})$, вычисленное в разных пространственных точках: $\varphi_k(\bar{x}) = \varphi(\bar{x}_k)$, $k = 1, 2, \dots$ Ниже перечислены наиболее интересные виды трансформаций координат и приведены соответствующие им уравнения низкочастотных муаровых полос.

Малому движению соответствует поле первой производной по направлению сдвига:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \bar{x}_2 + \delta\bar{x} = \bar{x} + \delta\bar{x}/2; \\ \varphi_1 - \varphi_2 &\approx \delta\bar{x} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(\bar{x}) = 2\pi N; \quad N = 0; \pm 1, \pm 2 \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\delta\bar{x} = \delta\bar{x}(\bar{x})$ — вектор сдвига двух дублей интерферограммы в точке \bar{x} . В частности, при жестком сдвиге муаровые полосы (4) визуализируют поле первой производной по направлению сдвига, при повороте — производную по полярному углу, а при изменении масштаба — производную по полярному радиусу [4].

Зеркальному отражению относительно оси $y = 0$ соответствуют поля первой и второй производных:

$$\begin{aligned} x_1 &= -x_2 = x; \quad y_1 = y_2 = y; \\ \varphi_1 - \varphi_2 &\approx 2x \frac{\partial}{\partial x} \varphi(0, y) = 2\pi N; \\ \varphi_1 + \varphi_2 &\approx 2\varphi(0, y) + x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(0, y) = 2\pi N. \end{aligned} \quad (5)$$

Инверсия относительно начала координат визуализирует первые и вторые производные поля $\varphi(\bar{x})$ [3]:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= -\bar{x}_2 = \bar{x}; \\ \varphi_1 - \varphi_2 &\approx 2\bar{x} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(0) = 2\pi N; \\ \varphi_1 + \varphi_2 &\approx 2\varphi(0) + \left(x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2xy \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi(0) = 2\pi N. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно, муарограммы (5), (6) могут одновременно содержать обе системы муаровых полос. Однако низкочастотными они становятся в различных областях муарограмм и поэтому при наблюдении или фоторегистрации не смешиваются.

Для проверки эффективности муаровых алгоритмов использовалась голографическая измерительная система, описанная в работе [6]. Ее основными элементами являются голографический интерферометр, устройство ввода оптической информации в ЭВМ с блоками управления в стандарте КАМАК, микроЭВМ «Электроника 60» и полутонный черно-белый дисплей. Все интерферограммы синтезировались или вводились в память ЭВМ и отображались на экране телемонитора фрагментами размером 256×256 элементов разрешения при 256 градациях яркости. Как показывает опыт,

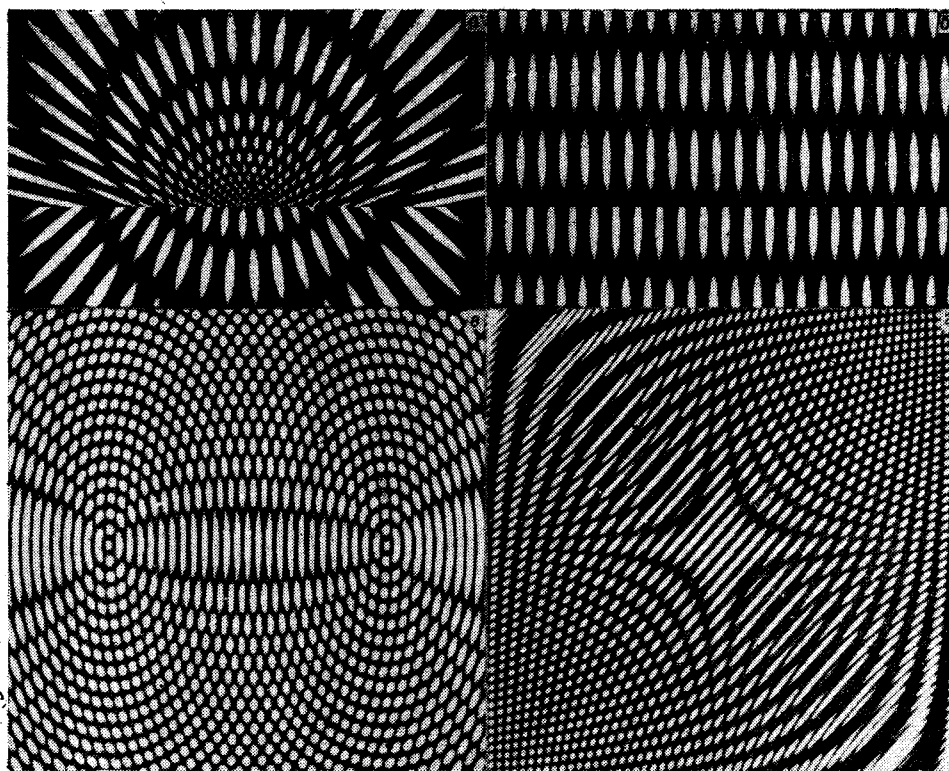


Рис. 1. Характерные виды муарограмм M_s , соответствующие:
 а — сдвигу, б — повороту, в — зеркальному отражению, г — инверсии

такие фрагменты могут содержать до 80 различных на экране интерференционных полос.

На рис. 1 представлены характерные муарограммы M_s , полученные на экране ЦВКУ типа ВК42Ц61. На них отчетливо прослеживаются как муаровые полосы, так и интерферирующие растры исходных полос. При этом на рис. 1, а, б, в наблюдаемой оказывается только одна система муаровых полос, описываемая уравнениями $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi N$, а на рис. 1, г одновременно присутствуют обе системы линий (5). В центральной области этой муарограммы полосы подчиняются уравнению $\varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi N$, а на периферийных участках — $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi N$.

Важное преимущество муарограмм — относительная простота реализации цифровых фильтров муаровых полос. Например, следующий тип муарограмм M_f содержит только муаровые полосы, а исходные растры отфильтрованы:

$$\begin{aligned}
 M_f &\equiv I_1 I_2 - I_0 (I_1 + I_2) + 2I_0^2 = \\
 &= I_0^2 \left[1 + \frac{V_1 V_2}{2} (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \right]. \quad (7)
 \end{aligned}$$

На рис. 2 показаны муарограммы M_f (7), полученные для тех же интерферирующих растров, что и муарограммы M_s (3), представленные на рис. 1. Сравнение фотографий позволяет наглядно убедиться в эффективности фильтрации муаровых полос, так как муарограммы M_f со-

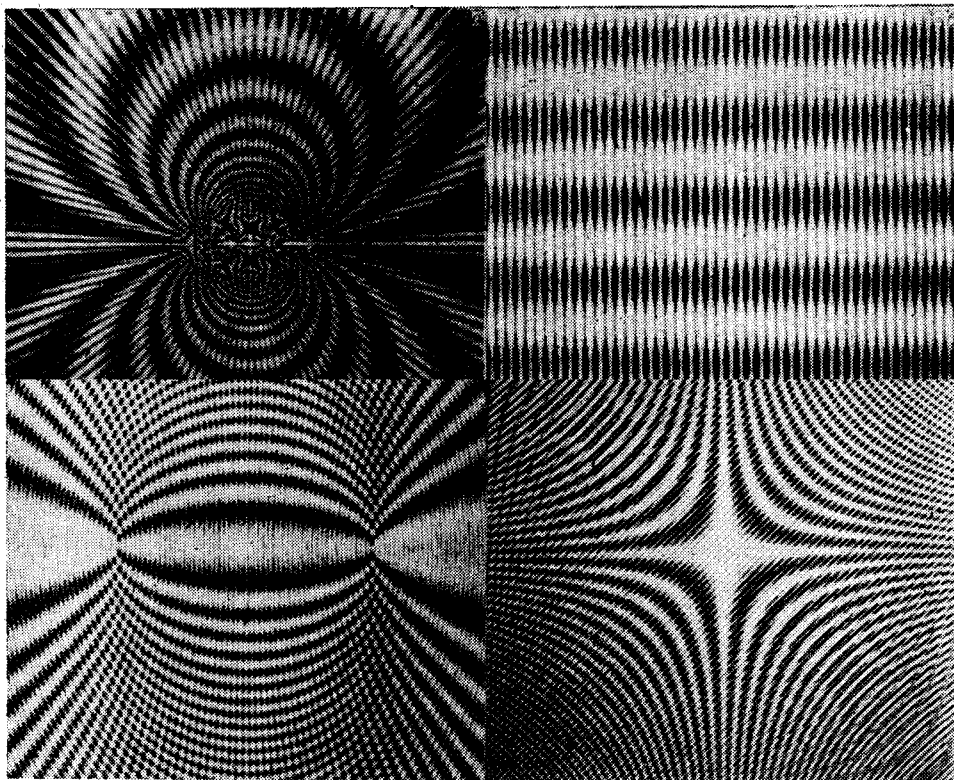


Рис. 2. Характерные виды муарограмм M_f , соответствующие муарограммам M_s на рис. 1

держат значительно больше различных муаровых линий, чем муарограммы M_s .

При исследовании механических объектов с помощью многоголограммных интерферометров попарная совместная обработка интерферограмм по правилу (7) позволяет визуализировать дополнительно еще две комбинации из компонент поля перемещений. Действительно, в указанном случае фазы φ_k определяются значением проекций вектора перемещения \bar{u} на векторы чувствительности интерферометра \bar{R}_k по правилу [3, 6]

$$\varphi_k = (2\pi/\lambda) \bar{R}_k \bar{u}, \quad k = 1, 2 \dots$$

Тогда муарограмма M_f содержит муаровые полосы, описываемые уравнениями

$$(\varphi_1 + \varphi_2) \equiv (2\pi/\lambda) (\bar{R}_1 + \bar{R}_2) \bar{u} = 2\pi N;$$

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \equiv (2\pi/\lambda) (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) \bar{u} = 2\pi N.$$

Однако указанное преобразование эффективно лишь в тех ситуациях, когда количества интерференционных полос на двух обрабатываемых интерферограммах отличаются незначительно: иначе на муарограмме M_f невозможно однозначно разделить два семейства муаровых линий, которые будут мало отличаться друг от друга.

Последовательное и наиболее полное решение задачи цифровой фильтрации муаровых картин дают методы фурье-фильтрации. Однако в

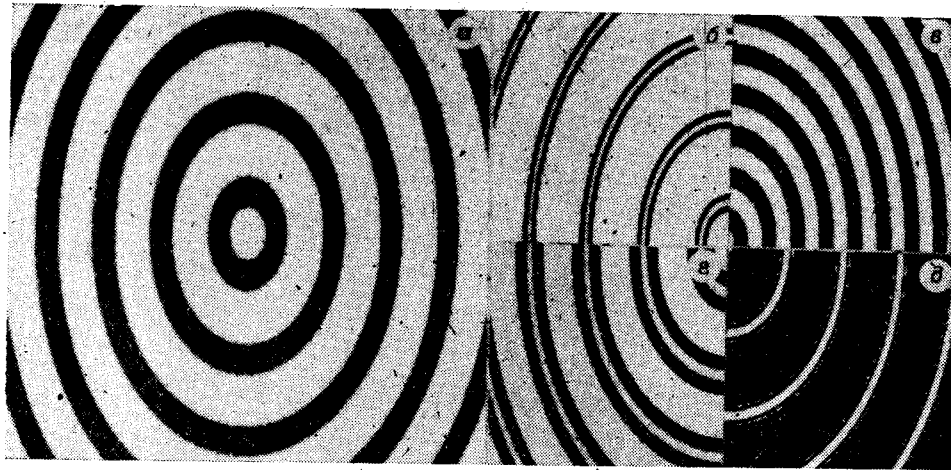


Рис. 3. Изменение исходной эталонной интерферограммы (а) под действием преобразования M_c при $A = I_0$ (а); $A = I_0/2$ (б); $A = I_0/8$ (в); $A = 15I_0/8$ (д)

приложениях они не всегда удобны из-за относительно низкой производительности соответствующих алгоритмов. По этой причине более предпочтительно преобразование интерферограммы, определяемое соотношением

$$M_{fc} \equiv M_f - (I_3 - I_0)^2 = \frac{I_0^2}{2} (1 + V_1 V_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) + \quad (9)$$

$$+ \frac{I_0^2}{2} (V_1 V_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - V_3^2 \cos 2\varphi_3) + \frac{I_0^2}{2} (1 - V_3^2),$$

где $\varphi_k = \varphi(\bar{x}_k)$, $k = 1, 2, 3$. Муарограмма M_{fc} содержит муаровые полосы, отвечающие уравнению $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi N$ (9), при условии, что второе слагаемое в выражении (8) обратится в нуль. Этим условием ограничивается также и область применения преобразования M_{fc} .

Следующий тип муарограмм M_c можно использовать для определения дробных долей интерференционных полос или выделения их середин. С этой целью выполняется квадратичное преобразование исходной интерферограммы $I(\bar{x})$ специального вида:

$$M_c \equiv I^2 - 2AI + B^2, \quad A^2 - B^2 \leq 0, \quad (10)$$

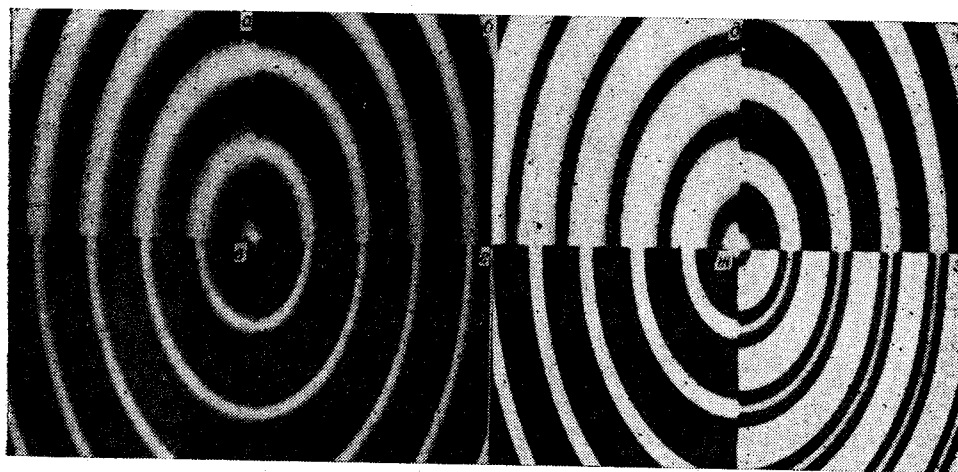


Рис. 4. Трансформации эталонных интерферограмм, имеющих контраст $V = 1$ (а); $V = 0,5$ (б) при действии преобразований (12):

$$M_p^2(\sigma, \epsilon); M_p^3(\sigma, \kappa); M_p^4(\sigma, \lambda)$$



Рис. 5. Преобразование реальной зашумленной исходной интерферограммы (а) с помощью муарограмм M_s (б, в); M_f (г, д); M_{fc} (е)

в котором значения параметров A и B фиксируются с учетом приведенных ниже свойств муарограммы M_c , а именно:

все темные и светлые полосы исходной интерференционной картины $I(\bar{x})$ переходят в светлые полосы муарограммы $M_c(\bar{x})$;

темные полосы распределения $M_c(\bar{x})$ описывает уравнение $I(\bar{x}) = A$, причем $\inf M_c = 0$, если $A = B$.

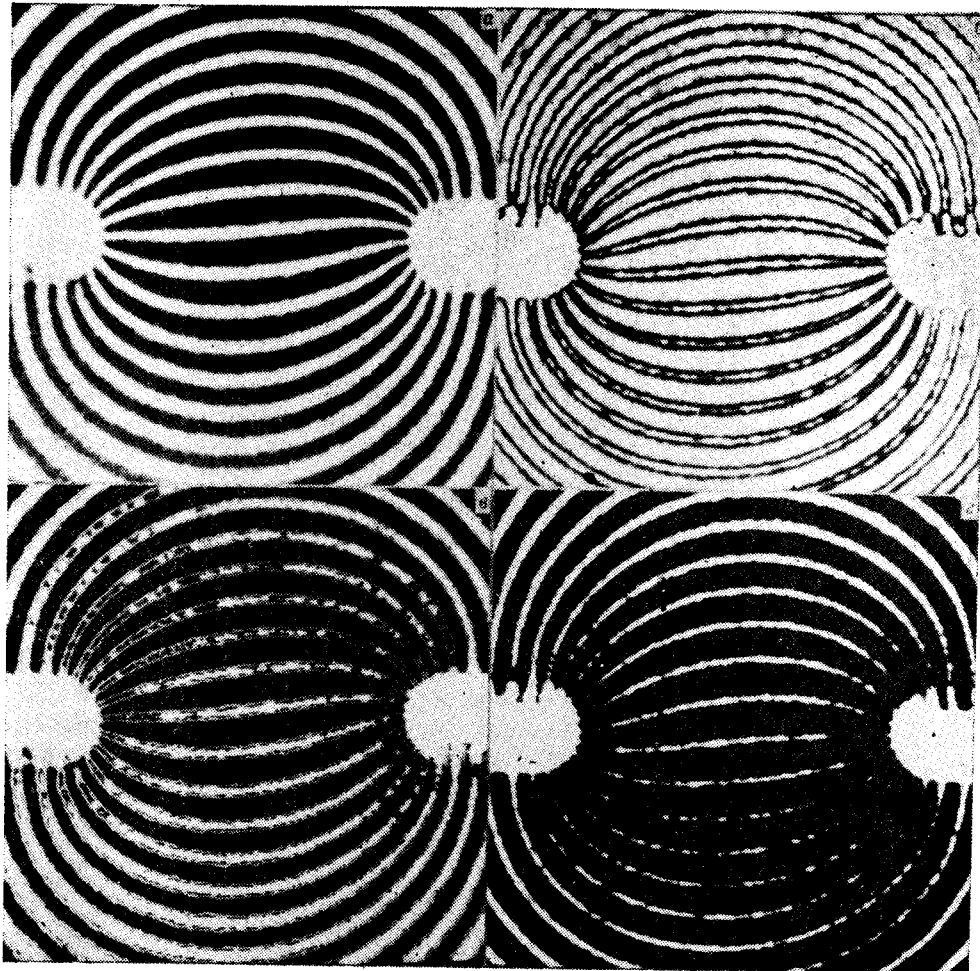


Рис. 6. Изменения реальной зашумленной интерферограммы (а) под действием преобразований M_c (б), $M_p^3(\varepsilon)$, $M_p^4(\varepsilon)$

Из указанных свойств следует, что для удвоения полос с помощью преобразования (10) необходимо принять $A = B = I_0$. При других значениях параметра A дополнительные полосы на муарограмме M_c смещаются к серединам светлых интерференционных полос, если $A > I_0$, к серединам темных полос, если $A < I_0$ (рис. 3). Вариации контраста $V(\bar{x})$ по полю интерферограммы не имеют значения для удвоения полос, так как из уравнения $I(\bar{x}) = I_0$ следует, что $\cos \varphi = 0$. Однако при выделении середин исходных интерференционных полос зависимость контраста от координат имеет отрицательное влияние, поскольку уровень A в этом случае должен быть переменным, что значительно усложняет алгоритм. Для выделения середин полос в такой ситуации более целесообразна реализация известной идеи, положенной в основу многоэкспозиционной голографической интерферометрии [3]. Выполняется полиномиальное преобразование исходной интерферограммы $M_p^k = M_p^k(I^k, I^{k-1}, \dots, I)$. Степень полинома k и его коэффициенты могут быть определены подбором в зависимости от контраста полос $V(\bar{x})$, их шага и дискретности ввода информации в ЭВМ так, чтобы выполнялось равенство

$$M_p^k \approx \frac{I_0^k}{2} \left(\frac{\sin(k+1)\varphi/2}{\sin\varphi/2} \right)^2. \quad (11)$$

Например, для случая $V(\bar{x}) = 1$ первые четыре функции M_p^h имеют вид (рис. 4, а-г):

$$\begin{aligned} M_p^1 &\equiv I = \frac{I_0}{2} \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi/2} \right)^2; \\ M_p^2 &\equiv 2I^2 - 2I_0 I + \frac{I_0^2}{2} = \frac{I_0^2}{2} \left(\frac{\sin 3\varphi/2}{\sin \varphi/2} \right)^2; \\ M_p^3 &\equiv 4I^3 - 8I_0 I^2 + 4I_0^2 I = \frac{I_0^3}{2} \left(\frac{\sin 2\varphi}{\sin \varphi/2} \right)^2; \\ M_p^4 &\equiv 8I^4 - 24I_0 I^3 + 22I_0^2 I^2 - 6I_0^3 I + \frac{I_0^4}{2} = \frac{I_0^4}{2} \left(\frac{\sin 5\varphi/2}{\sin \varphi/2} \right)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Применение преобразований (12), полученных для случая $V = 1$, к интерферограммам с низким контрастом полос тем не менее оказывается эффективным и позволяет добиться значительного сужения линий (рис. 4, б-г).

Преобразования реальных интерферограмм при обработке с помощью «муаровых алгоритмов» показаны на рис. 5, 6. Исходные интерферограммы (рис. 5, а; 6, а) были зарегистрированы на технической фотопленке; они визуализируют линии уровня продольной компоненты поля перемещений плоского образца с симметричными боковыми вырезами при растяжении. Фильтрация высоко- и низкочастотных шумов намеренно не выполнялась для оценки их влияния. К тому же фоторегистрация интерферограмм существенно исказила идеальные косинусоидальные профили полос (1) как в светлых, так и в темных областях. Однако даже в этом случае муаровые алгоритмы являются достаточно эффективным средством преобразования оптической информации и дают наглядную информацию о полях деформаций (см. рис. 5) и расположении середин интерференционных полос (см. рис. 6).

ВЫВОДЫ

Рассмотрен способ преобразования интерферограмм на основе цифровой реализации муаровых эффектов, который позволяет визуализировать первые и вторые производные поля фазовых искажений, удваивать количество интерференционных полос и производить их сужение.

Муаровые алгоритмы оказываются достаточно эффективными и при обработке зашумленных интерферограмм с искаженными при регистрации профилями интерференционных полос.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюрелли Д., Паркс В. Исследование деформаций с использованием муара.— М.: Мир, 1974.
2. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Применение муара интерференционных полос для обнаружения дефектов.— Дефектоскопия, 1984, № 12.
3. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
4. Brown N., Oreb V. F., Hariharan P. Pseudocolour picture displays with a micro-computer.— J. Phys. Ser. E: Sci. Instrum., 1982, v. 15, p. 703—704.
5. Ушаков А. Н. Автоматическая обработка интерферограмм на ЦВМ.— В кн.: Цифровая обработка сигналов и ее применение. М.: Наука, 1981.
6. Козачок А. Г. Голографические методы в экспериментальной механике.— М.: Машиностроение, 1984.

Поступила в редакцию 4 ноября 1985 г.