

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МУАРОВЫХ КАРТИН В ГОЛОГРАММНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

К. С. Мустафин и В. А. Селезнев

Рассматривается способ получения муарограмм с повышенной чувствительностью, в котором муаровые картины получаются при взаимодействии двух голограмм с кратными периодами. Рассмотрены факторы, ограничивающие увеличение чувствительности в этом способе.

Как указывалось в [1], освещение нелинейно записанной голограммы исследуемого волнового фронта двумя пучками приводит к появлению муаровой картины, обладающей в n раз увеличенной чувствительностью, если освещающие пучки образуют пространственную частоту в n раз большую, чем пространственная частота голограммы. Очевидно, такие картины могут наблюдаться на поверхности дважды экспонированной голограммы, если пространственные частоты удовлетворяют указанному выше требованию. Используя муаровые картины, можно просто и быстро получать информацию об исследуемом объекте, так как для этого не требуется процесса восстановления. Поэтому анализ пределов применимости муарового эффекта в голограммной интерферометрии с повышенной чувствительностью представляет практический интерес.

Не останавливаясь на изложении принципа образования муаровых картин, который для подобного случая достаточно полно описан в работе [2] и более ранней работе [3] (хотя и не использующей основ голографии), рассмотрим ограничение роста чувствительности, вызванное уменьшением видности муаровых картин.

Предположим, что на одной фотопластинке двукратным экспонированием записаны распределения интенсивностей

$$I_1(x; y) = (a_1^2 + b_1^2) \{1 + A_1 W_1 \cos [\varphi(x; y) - \xi x]\}, \quad (1)$$

$$I_n(x; y) = (a_n^2 + b_n^2) [1 + A_n W_n \cos (n\xi x)], \quad (2)$$

где $\varphi(x; y)$ характеризует фазовые возмущения, вносимые исследуемым объектом; a_1, b_1 и a_n, b_n — модули амплитуд интерферирующих волн при первой и второй экспозициях; W_1 и W_2 — видности голографируемых картин в каждом регистрируемом распределении интенсивностей; A_1 и A_n — коэффициенты, учитывающие функцию передачи модуляции регистрирующей среды; $\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha$; α — угол голографирования; x, y — координаты в плоскости голограммы; $n=1, 2, 3, \dots$

В уравнениях (1) и (2) предполагается, что вторая экспозиция [уравнение (2)] обеспечивает пространственную частоту в n раз большую, чем первая. Амплитудное пропускание голограммы можно описать уравнением

$$T_a(x; y) = k (I_1 + I_n)^{-\gamma/2}, \quad (3)$$

где k — константа, γ — коэффициент контрастности фотоматериала. Разлагая (3) в ряд с учетом (1) и (2), можно написать

$$T_a(x; y) = k(c_0 + d_0)^{-\gamma^2} \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{\infty} f_j F^j \right\}, \quad (4)$$

где использованы следующие обозначения

$$F = 2d_1 \cos(\varphi - \xi x) + 2d_n \cos(n\xi x),$$

f_j характеризуют коэффициенты разложения, зависящие только от γ , $c_0 = a_1^2 + b_1^2$, $d_0 = a_n^2 + b_n^2$, $d_n = \frac{d_0 A_n W_n}{2(c_0 + d_0)}$, $d_1 = \frac{c_0 A_1 W_1}{2(c_0 + d_0)}$.

В развернутом виде ряд (4) будет состоять из членов, характеризующих те волны, которые следует ожидать в соответствующих порядках дифракции при восстановлении. Среди них имеются и такие, фазы которых при данном значении n содержат информацию об исследуемом волновом фронте ($n\varphi$), но не содержат величин кратных или равных ξx . Их появление вызвано рассогласованием пространственных частот, созданных при первом и втором голографировании, причем степень рассогласования определяется функцией $\varphi(x, y)$. Роль этих членов проявляется в модуляции средней плотности почернения голограммы и, следовательно, в образовании муаровой картины. Поэтому эти члены могут использоваться для оценки характеристик муаровых картин.

Для рассмотрения глубины модуляции (или видности муаровых картин) при соответствующих значениях n , выпишем из уравнения (4) оговоренные выше члены и постоянные составляющие. После группировки подобных членов интересующая нас функция будет иметь вид

$$\begin{aligned} T'_a(x; y) = & C_n + 2(f_2 d_1 d_n + 12 f_4 d_1^3 d_n + 12 d_1 f_4 d_n^3 + 60 d_1^2 f_6 d_n + 180 f_6 d_1^3 d_n^3 + \dots) \times \\ & \times \cos[\varphi - \xi x(1 - n)] - 2(3 f_3 d_1^3 d_n + 20 f_6 d_n d_1^4 + \dots) \cos[2\varphi - \xi x(2 - n)] + \\ & + 2(4 f_4 d_1^3 d_n + 30 f_6 d_1^5 d_n + 60 f_6 d_1^3 d_n^3 + \dots) \cos[3\varphi - \xi x(3 - n)] - \\ & - 2(5 f_5 d_1^4 d_n + \dots) \cos[4\varphi - \xi x(4 - n)] + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$C_n = 1 + 2f_2 d_1^2 + 2f_2 d_n^2 + 6d_1^4 f_4 + 6f_4 d_n^4 + 24f_4 d_1^2 d_n^2 + 20f_6 d_1^6 + 180d_1^4 d_n^2 f_6 + 180d_1^2 d_n^4 f_6 + 20f_6 d_n^6 + \dots$$

является постоянной составляющей разложения при заданных n .

Анализируя (5), можно отметить, что изменение пространственной частоты при голографировании фронта сравнения в n раз приводит к такому же увеличению числа муаровых полос. При этом, если допускается нестрогая кратность частот при голографировании, то наблюдаемые муаровые полосы будут эквивалентны интерференционным полосам конечной ширины, причем смещения полос будут пропорциональны $n\varphi(x, y)$.

Рассматривая ряд (4), можно заметить, что образование муаровых картин с увеличенной чувствительностью происходит из-за взаимодействия n -й гармоники исследуемой структуры (которая составляет голограмму исследуемого волнового фронта) с основной частотой структуры сравнения (т. е. голограммы волнового фронта сравнения).

Используя (5), напишем в общем виде уравнение для пропускания по интенсивности в муаровой картине в случае n -кратного увеличения чувствительности

$$[T'_a(x; y)]^2 = C_n^2 + 4C_n D_n \cos n\varphi + 4D_n^2 \cos^2 n\varphi, \quad (6)$$

где D_n — коэффициенты при косинусах в (5), содержащих $n\varphi(x, y)$.

Видность муаровых картин, определяемая как

$$W_n = \frac{(T'_a)_{\max}^2 - (T'_a)_{\min}^2}{(T'_a)_{\max}^2 + (T'_a)_{\min}^2},$$

может быть найдена из анализа экстремальных значений уравнения (6). Легко показать, что

$$W_n = \frac{4C_n D_n}{C_n^2 + 4D_n^2} \quad (7)$$

при $C_n > 2D_n$ и что $W_n = 1$ при $C_n \leq 2D_n$.

На рис. 1 приведены графики функции $W_n = \psi(\gamma)$, рассчитанные по формуле (7) с учетом характеристик фотопленки Микрат-300. Каждая кривая рис. 1 соответствует различным значениям n . При расчете предполагалось, что при записи голограмм использованы пространственные частоты, равные 10 мм^{-1} и кратные этому значению. Соответствующие значения функции передачи модуляции брались по экспериментальным данным, полученным голографическим методом, аналогичным [4]. Для того

чтобы разложение (4) было справедливо, при расчете предполагалось, что видности голографируемых картин (W_1, W_n) и выбранная рабочая точка на характеристической кривой обеспечивают запись интенсивностей (1) и (2) в области постоянного значения γ .

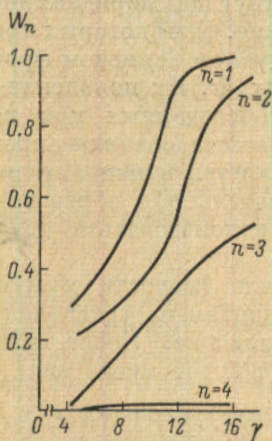


Рис. 1. Зависимость видности муаровых картин от γ при различных значениях n .

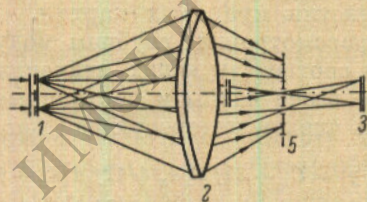


Рис. 2. Оптическая схема установки.

1 — дифракционная решетка, 2 — объектив, 3 — фотопленка, 4 — исследуемый объект, 5 — диафрагма.

Предполагалось также, что, изменяя условия обработки фотослоя, можно изменять его контраст от 4 до 16.

Приведенные кривые позволяют сделать вывод, что практически предельным случаем нужно считать $n=4$, несмотря на то что видности муаровых картин возрастают с ростом γ .

Следует помнить, что приведенные кривые не обладают высокой точностью, особенно при больших значениях γ , ввиду того что разложение (4) ограничивалось случаем $j=5$. На практике можно получить несколько большие значения видностей муаровых картин, так как можно использовать значения W_1 , близкие или равные единице, тогда как расчет был проведен для случая $W_1 = W_2 = 0.5$.

Экспериментально описанный способ получения муарограмм с повышенной чувствительностью был опробован на установке, оптическая схема которой изображена на рис. 2. Пучки света, образующие кратные значения пространственных частот, создавались с помощью дифракционной решетки 1 и объектива 2. Дифракционная решетка представляла собой голограмму невозмущенных параллельных пучков, полученную с помощью высококачественной оптики, и имела пространственную частоту 8 мм^{-1} . Используемый объектив 2 проверялся на отсутствие aberrаций последующим голографированием пучков, проходящих различные зоны объектива. При этом структуры, полученные от пучков, проходящих дальние зоны объектива, сравнивались со структурой, образованной приосевыми пучками. Наблюдаемая при этом муаровая картина соответствовала бесконечной полосе настройки двухлучевого интерферометра и свидетельствовала о строгой кратности образованных пространственных частот. Голографи-

рование выполнялось двойным экспонированием; при одной из них записывался исследуемый объект с использованием нулевого и первого порядков дифракции решетки (1). Запись пучка сравнения производилась с использованием 1 и -1 , 1 и -2 , 2 и -2 порядков дифракции. При этом соотношения интенсивностей в каждой паре пучков были близки к единице.

На рис. 3, а представлена муарограмма, полученная двукратным экспонированием, проводимым с одной и той же пространственной частотой. Наблюдаемые полосы вызваны клиновидностью стеклянной пластинки, используемой в качестве объекта. Рис. 3, б, в, г соответствуют

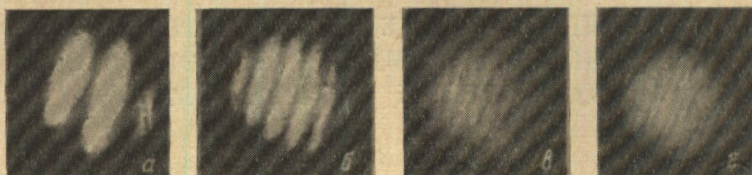


Рис. 3. Муаровые картины клиновидной пластинки стекла, соответствующие различным n .

а — $n=1$, б — $n=2$, в — $n=3$, г — $n=4$.

случаю, когда голографирование пучков сравнения проводилось на частотах в 2, 3 и 4 раза больших, чем пространственная частота при голографировании исследуемого объекта. Приведенные муарограммы демонстрируют увеличение чувствительности в два, три и четыре раза соответственно. Как видно из рис. 3, видность муаровых картин резко падает, что подтверждается теоретически рассчитанными кривыми. При этом муарограмму 3, г, соответствующую случаю $n=4$, удалось сохранить благодаря использованию максимальной видности голографируемых картин и высококонтрастного фотоматериала при печатании.

Подобные муарограммы можно наблюдать и при наложении двух голограмм, на которых отдельно экспонированы исследуемый волновой фронт и волновой фронт пучка сравнения. Такое видоизменение способа упрощает схемы голограммных интерферометров, так как структуры сравнения могут быть подготовлены предварительно.

В заключение отметим, что, несмотря на резкий спад видности муаровых картин, использование данного способа увеличения чувствительности оправдывается его простотой и оперативностью.

Литература

- [1] К. С. Мустафин, В. А. Селезнев. *Опт. и спектр.*, 28, 1186, 1970.
- [2] P. H. Langenbeck. *Appl. Opt.*, 8, 543, 1969.
- [3] D. Post. *Appl. Opt.*, 6, 1938, 1967.
- [4] В. И. Бобринев. Научно-техническая конференция по квантовой электронике. М., 36, 1967 (РИР № 7, 109, 1968).

Поступило в Редакцию 22 февраля 1971 г.