

А. Н. ГРИШАНОВ, С. Т. Де, А. В. КУХАРЕНКО, В. А. ХАНДОГИН
(Новосибирск)

О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ РАСШИФРОВКЕ ДВУХДЛИННОВОЛНОВЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ТОПОГРАММ

Одно из основных достоинств голографической интерферометрии состоит в возможности получения количественной информации об исследуемом объекте. Однако многообразие методов регистрации голографических интерферограмм делает невыгодным применение универсальных алгоритмов: более точными и производительными оказываются специализированные алгоритмы расшифровки, учитывающие особенности конкретной задачи. Здесь мы ограничимся рассмотрением алгоритмов статической обработки интерферограмм, которые, хотя и уступают динамическим [1] в быстродействии, но пока превосходят их в точности, что в ряде случаев имеет решающее значение.

Можно указать два дополняющих друг друга подхода к решению задачи о статической расшифровке интерферограмм. При одном из них выполняется выделение середин интерференционных полос, по которым затем определяется поле фазовых искажений [2]; при другом на каждой полосе указывается несколько реперных точек, между которыми восстанавливается (путем интерполяции) положение середины полосы [3]; дальнейшая обработка интерферограмм осуществляется единообразно. При первом подходе полностью выделяется середина полосы, но при этом существенное отрицательное влияние оказывает спекл-шум голографического изображения, который приводит к негладкости выделенных линий. Применение второго снижает вредное влияние спекл-шума, но требует аппроксимации середины полосы между реперными точками [4]; этот метод оказывается предпочтительнее в ситуациях, когда интерференционные полосы мало отличаются от известной заранее эталонной конфигурации, и поэтому их аппроксимация по реперным точкам может быть осуществлена с достаточной точностью.

В предлагаемой статье рассматривается реализация второго варианта статической расшифровки, при которой определение реперных точек осуществляется на основе анизотропной фильтрации интерферограмм. Эффективность предложенного алгоритма иллюстрируется на примере анализа характеристик двухдлинноволновой голографической топографии [5].

Алгоритм расшифровки интерферограмм. Предположим, что интерферограмма зарегистрирована на промежуточном носителе в пределах линейного участка его характеристики. Тогда плотность почернения интерферограммы пропорциональна яркости восстановленного с голограммы изображения, которая в общем случае задается соотношением [1—7]

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

где $I(x, y)$ — яркость изображения в текущей точке (x, y) ; $I_0(x, y)$ — случайная функция, аппроксимирующая изображение объекта быстро осциллирующими распределениями, воспринимаемыми как спекл-шум; $V(x, y)$, $\Phi(x, y)$ — контраст и фаза интерференционных полос. Выражение (1) показывает, что полезный сигнал интерферограммы $\Phi(x, y)$ вызывает существенную анизотропию яркости $I(x, y)$. Эта анизотропия может быть эффективно использована для подавления спекл-шума, если известно, что реальная форма интерференционных полос $\Phi(x, y) = \text{const}$ мало отличается от известной эталонной формы, задаваемой уравнением $\Phi_0(x, y) = \text{const}$, где $\Phi_0(x, y)$ — фаза эталонных полос. Указанное условие реализуется, например, в задачах неразрушающего контроля или при анализе метрологических характеристик новых способов измерений путем

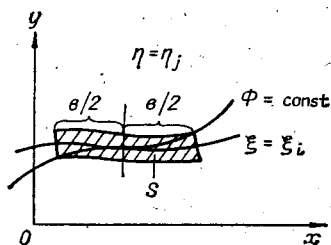


Рис. 1. Криволинейная область анизотропного фильтра

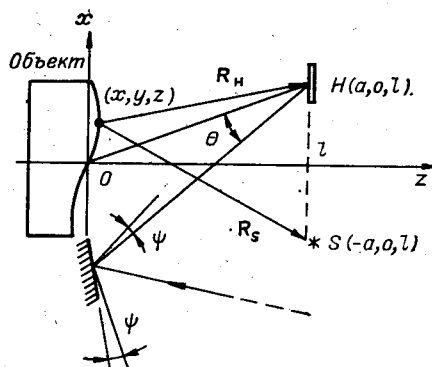


Рис. 2. Расчетная схема двухдлинноволнового топографического интерферометра

исследования эталонных объектов, для которых результат эксперимента заранее известен.

Фильтрацию интерферограммы (1) целесообразно выполнять не в координатах x, y , а в новых координатах ξ, η , задаваемых формой эталонных полос:

$$\xi = \Phi_0(x, y); \quad \eta = |\text{grad } \Phi_0(x, y)|. \quad (2)$$

Для иллюстрации рассмотрим фильтрацию с помощью прямоугольного окна. Размеры прямоугольной области осреднения S выбираются следующим образом (рис. 1). Ширину области S , т. е. размер поперек интерференционных полос, естественно принять минимальным и равным одному — трем шагам дискретизации l поля яркости (1) при его вводе в память ЭВМ. Тогда частота среза в этом направлении примерно равна частоте дискретизации, поэтому профили и положения интерференционных полос при фильтрации не искажаются. Длина $N_s l$ области осреднения S определяется в этом случае условием

$$\max |\varphi(\xi_i, \eta_j \pm N_s l/2) - \varphi(\xi_i, \eta_j)| \leq (1 \div 3) l/2; \quad \varphi(\xi, \eta) = \Phi(x, y), \quad (3)$$

где i, j — целочисленные индексы точек оцифровки яркости в новых координатах; ξ_i, η_j — координаты центра криволинейного прямоугольника S . Соотношение (3) показывает, что в пределах площади S эталонная и реальная изофазные линии не должны расходиться больше, чем на один — три шага дискретизации (см. рис. 1). Конечно, при обработке реальной интерферограммы невозможно точно выполнить условие (3), так как поле $\Phi(x, y)$ заранее неизвестно. Поэтому процесс расшифровки интерферограмм с использованием анизотропного фильтра необходимо реализовывать в виде итерационной процедуры (типичный пример показан на рис. 3; пояснение см. ниже).

Для оценки эффективности фильтра предположим, что оцифровка поля яркости осуществляется с учетом рекомендаций работы [6] так, что апертура считывающей диафрагмы в 3—5 раз больше среднего размера спеклов. В результате среднеквадратическое отклонение яркости, которое, как известно [7], равно $I_0(x, y)$, при вводе интерферограммы в ЭВМ снизится также в 3—5 раз. Выполняя очевидные выкладки, можно получить, что при $N_s = 40$ шаг интерференционных полос h , т. е. расстояние между соседними максимумами (или минимумами) функции $I(x, y)$, после фильтрации определяется с погрешностью не более чем $\pm h/(20 \div 25)$. Этот уровень погрешности, как правило, меньше ошибок округления и вполне удовлетворяет практическим потребностям. Отметим, что при использовании непрямоугольных окон эффективность фильтрации может быть повышена за счет увеличения ширины области S .

Кроме высокочастотных спекл-шумов, на реальной интерферограмме присутствуют и низкочастотные, отраженные в формуле (1) в виде функций $I_0(x, y)$ и $V(x, y)$. Из-за этого поточечная расшифровка поля яркости $I(x, y)$ путем обращения формулы (1) невозможна. Однако шаг полос

восстанавливается с высокой точностью, так как низкочастотный шум не искажает положение экстремумов функции $I(x, y)$. Учитывая изложенное, можно существенно сократить время обработки интерферограммы. ошибки округления, возникающей при дискретизации непрерывного поля яркости (1).

Дальнейшая расшифровка интерферограмм выполняется по известным правилам [2—5], которые определяются спецификой конкретной измерительной задачи. В настоящей работе рассмотренный выше способ использован для расшифровки двухдлинноволновых голографических топограмм действительного изображения [5]. Теоретический анализ, выполненный в работе [5], показал, что указанный тип голографических топограмм обладает важными преимуществами (отсутствие паразитных полос при неоптимальной компенсации опорных пучков, хорошее качество интерференционных картин и др.). Ниже описаны результаты экспериментальной проверки свойств топограмм действительного изображения на основе количественной расшифровки интерферограмм эталонной оптически плоской поверхности.

Анализ двухдлинноволновых топограмм. Для точного расчета интерференционных эффектов необходимо учитывать следующие параметры интерферометра (рис. 2): $OS = OH = 600$ мм — расстояние от центра голограммы до освещающего источника и голограммы соответственно; $\theta = 48^\circ$ — угол между коллимированным опорным пучком и вектором OH ; $2a = 100, 600$ мм — расстояние между освещающим источником и голограммой; ψ — угол компенсации опорного пучка. Используя соотношения, полученные в работе [5], можно показать, что значение угла ψ определяется из условия

$$(1/\lambda_2)(R_{b1} - R_{b2}) + (R_{r1}/\lambda_1 - R_{r2}/\lambda_2) = 0, \quad (5)$$

где λ_1, λ_2 — длины волн, используемые при записи топограммы, которая восстанавливается в длине волны λ_2 ; R_{b1}, R_{b2} — расстояния от центра голограммы до сопряженных точек двух восстанавливаемых волновых фронтов; R_{r1}, R_{r2} — расстояния от голограммы до источника опорной волны. Условие (5) для указанных выше параметров интерферометра дает следующие значения угла компенсации опорных пучков: $\psi = 9 \cdot 10^{-5}$ при $2a = 100$ мм и $\psi = 6 \cdot 10^{-5}$ при $2a = 600$ мм ($\lambda_1 = 476,486$ нм, $\lambda_2 = 476,243$ нм).

Выражение (5) отличается от традиционного условия компенсации опорных пучков (приведенного, например, в [5]) наличием первого слагаемого, которое в общем случае не является малым. Значение угла компенсации, определенное из условия компенсации ($\psi = 20 \cdot 10^{-5}$), оказывается завышенным.

В эксперименте истинное значение угла компенсации определялось путем подбора такого угла ψ , для которого интерференционные полосы локализовались вблизи исследуемой поверхности. Полученные таким образом значения ψ оказались близкими к тем, которые найдены из условия (5).

При точной компенсации опорных пучков интерференционные полосы подчиняются ([5]) уравнению вида

$$R_s + R_H = qN; \quad q = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) = 0,938 \text{ мм}, \quad (6)$$

где R_s, R_H — расстояния от текущей точки на поверхности образца до освещающего источника и голограммы соответственно; N — абсолютный порядок интерференционных полос. Используя обозначения рис. 2, пре-

образуем уравнение (6) к форме

$$(z - l)^2 = \frac{1}{4} q^2 N^2 + \frac{4a^2 x^2}{q^2 N^2} - (x^2 + y^2 + a^2), \quad (7)$$

где (x, y, z) — координаты произвольной точки на поверхности исследуемого образца. Уравнение (6) так же, как и (5), не приспособлено для расшифровки реальных топограмм, поскольку невозможно правильно определить абсолютный порядок полос N . Введем относительные порядки полос, учитывая, что в начале координат уравнение (7) имеет вид

$$l^2 = (1/4) q^2 N_0^2 - a^2, \quad (8)$$

где N_0 — не обязательно целое число, определяющее фазу интерференционной картины в точке $(0, 0, 0)$. Тогда относительные порядки полос $n \equiv N - N_0$ позволяют подсчитывать высоту $z(x, y)$ исследуемой поверхности относительно точки $z = 0$. Подставляя (7) в (8) и разрешая последнее уравнение относительно z , получаем правило для расшифровки топограмм:

$$z(x, y) = l - \sqrt{l^2 + Q(x, y)} = Q(x, y)/2l + O(Q^2);$$

$$Q(x, y) = x^2 + y^2 - \frac{4a^2 x^2}{q^2 N^2} - \sqrt{l^2 + a^2} qn - \frac{q^2 n^2}{4}. \quad (9)$$

Правило расшифровки (9) позволяет достаточно просто рассчитывать относительные высоты макрорельефа исследуемой поверхности $z(x, y)$ и, по существу, представляет собой условие компенсации систематической по-

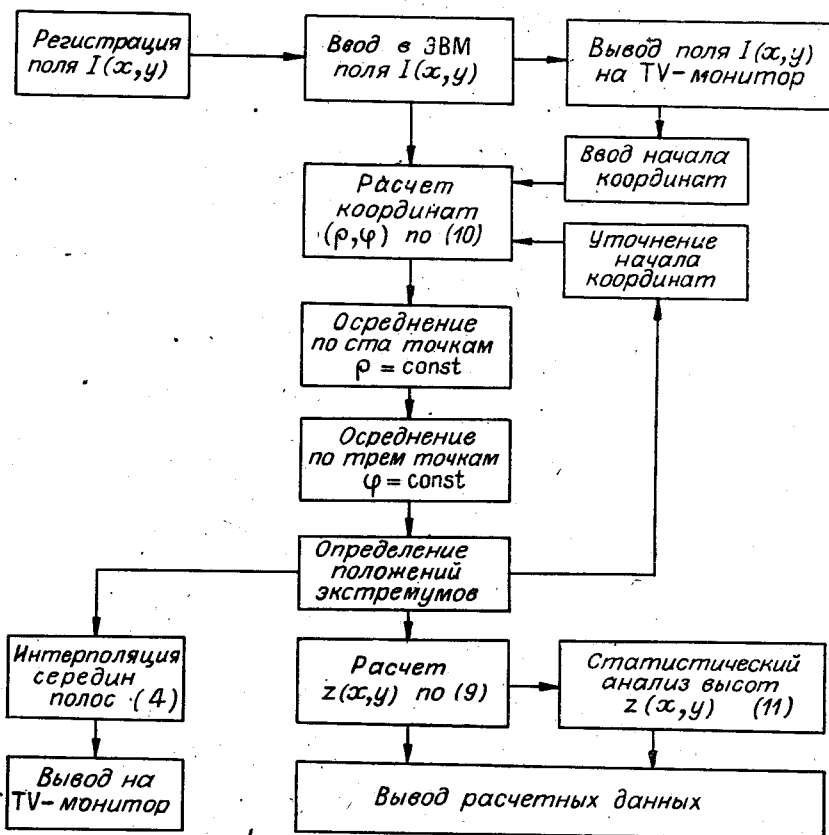


Рис. 3. Схема расшифровки двухдлинноволновых топограмм на основе анизотропной фильтрации в эллиптических координатах

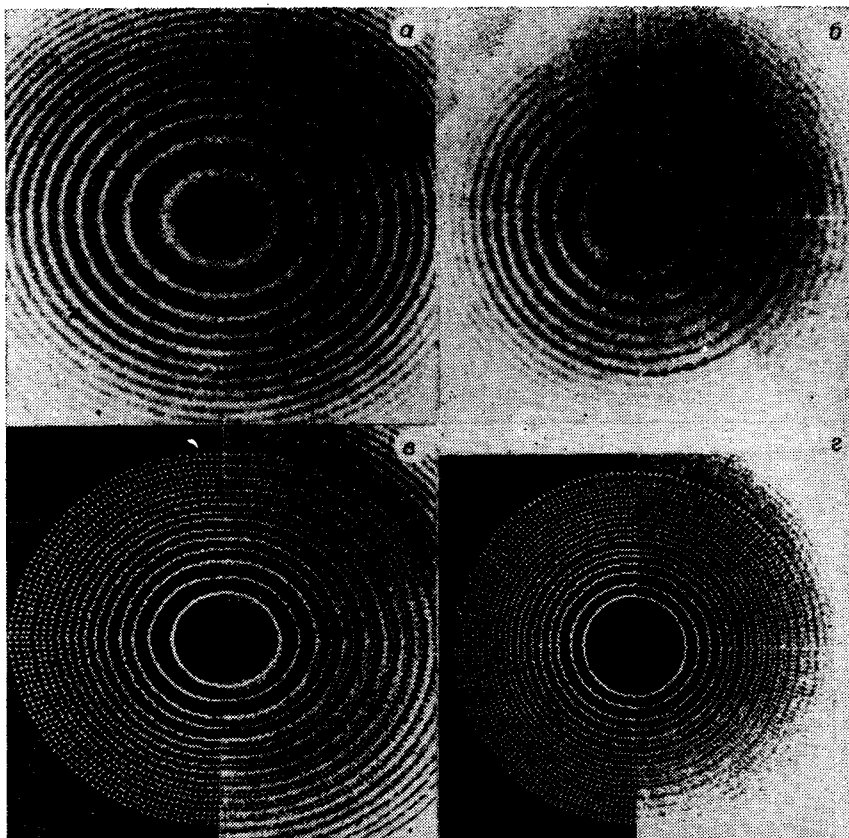


Рис. 4. Типичные интерферограммы эталонной плоскости, полученные при $\psi = 6 \cdot 10^{-5}$, $a = 300$ мм (а), $\psi = 10^{-5}$, $a = 50$ мм (б), а также результаты интерполяции середин полос по выделенным реперным точкам (в, г) для этих интерферограмм

грешности, обусловленной эллиптичностью секущих поверхностей. Для точных расчетов на практике необходимо лишь правильно определить геометрические параметры интерферометра, схема которого для данного случая показана на рис. 2.

В качестве образца в эксперименте использовалась оптически плоская поверхность диаметром 210 мм. Схема интерферометра юстировалась так, чтобы исследуемая плоскость имела вид $z(x, y) = 0$, а начало координат помещалось в центре образца. Тогда из уравнения (9) следует, что интерференционные полосы представляют собой семейство софокусных эллипсов. С учетом этого анизотропная фильтрация выполнялась в эллиптической системе координат:

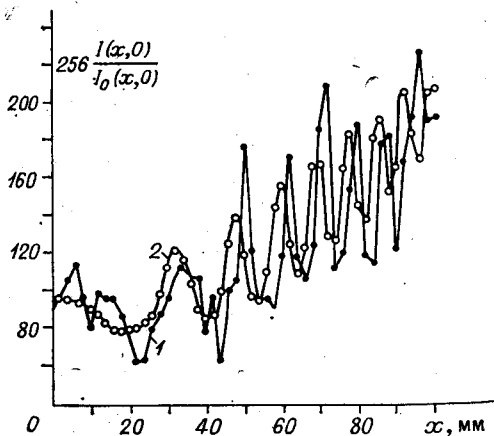
$$x = (1 + \epsilon)\rho \cos \varphi; \quad y = (1 - \epsilon)\rho \sin \varphi, \quad (10)$$

где $\epsilon = a^2/4l^2 + 0(a^4/16l^4)$ — параметр эллиптичности; ρ , φ очевидным образом выражаются через декартовы координаты x , y .

Начальное положение системы координат задавалось после визуальной оценки введенного поля яркости (рис. 3), а затем уточнялось путем симметризации положения наиболее удаленной интерференционной полосы. Это уточнение не превышало одного-двух элементов разрешения (с длиной 0,65 мм) и достигалось за две-три итерации.

На каждой светлой или темной интерференционной полосе определялись четыре реперные точки, лежащие на осях координат. Положение середины полосы интерполировалось между реперными точками линейной функцией (4). Результат контролировался визуально с экрана TV-монитора (рис. 4). Типичные графики распределения яркости на оси Ox до и

Рис. 5. Графики яркости на горизонтальной оси до фильтрации 1 и после фильтрации 2



после фильтрации (рис. 5) наглядно иллюстрируют снижение случайных флуктуаций поля $I(x, 0)$. Отметим, что, несмотря на относительно низкий контраст полос и высокий уровень низко- и высокочастотных шумов изображения, автоматическое выделение середин полос осуществлялось без явных ошибок. При этом на каждой интерферограмме выделялось по 10 (при $a = 50$ мм) и 8 (при $a = 300$ мм) пар интерференционных полос, для чего определялись положения соответственно 80 и 64 экстремумов яркости.

После фильтрации и проверки данных выделения середин полос производился расчет высот рельефа $z(x, y)$ по формулам (9). В результате получались достаточно представительные выборки значений высоты $z(x, y)$ (объемом от 64 до 80 элементов). По ним рассчитывались средние значения и дисперсии высот на координатных осях:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (z(x_i, 0) - \bar{z}_1)^2; \bar{z}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z(x_i, 0);$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (z(0, y_j) - \bar{z}_2)^2; \bar{z}_2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m z(0, y_j);$$
(11)

где $m = 32$, 40 — количество реперных точек на осях координат; $z(x_i, y_j)$ — значения высоты в реперных точках, рассчитанные по формулам (9). Определялись также коэффициенты линейной регрессии вида $z = z_0 + b_1x + b_2y$ и гистограммы выборочной плотности распределения при группировке в интервалы шириной $\Delta z = 0,04$ мм. Данные расчетов представлены в таблице и позволяют сделать следующие выводы:

отступления линейной регрессии от плоскости $z = 0$ оказываются незначимыми и находятся в пределах погрешности ввода и расшифровки для всех интерферограмм;

выборочные распределения симметричны относительно среднего значения высоты;

дисперсии значений высот подтверждают высокую точность расшиф-

Статистические характеристики высот эталонной плоской поверхности при разных углах Ψ

a , мм	ψ 10°	b_1 10°	b_2 10°	σ_1 10² мм	σ_2 10² мм
50	8	-6	-4	6,2	2,8
	9	-5	-28	3,3	4,7
	10	-43	-47	5,8	5,9
300	5	40	-21	3,8	2,6
	6	12	4	3,0	3,7
	7	-5	10	3,3	4,5

ровки ($\sigma_{1,2} \approx q/20$) и не превышают погрешности, обусловленной дискретизацией поля яркости $I(x, y)$ при вводе в ЭВМ (шаг дискретизации 0,65 мм).

Таким образом, точная количественная расшифровка двухдлинно-волновых топограмм эталонной плоской поверхности подтверждает достоинства топограмм действительного изображения.

2. Выбор оптимального угла компенсации необходимо осуществлять по уравнению (5), которое отличается от традиционного. Эксперимент подтверждает этот вывод.

3. Расшифровка топограмм действительного изображения при оптимальной и неоптимальной компенсациях опорных пучков может быть осуществлена по уравнению (6). Предложено правило для введения относительных порядков полос в уравнение для интерференционных полос, которое в этом случае является условием компенсации систематической погрешности измерений, обусловленной эллиптичностью секущих поверхностей.

4. Расшифровка реальных интерферограмм эталонной плоской поверхности подтверждает предсказанные теоретически преимущества топограмм действительного изображения. Погрешность расшифровки не превышает погрешность дискретизации поля яркости и для шести обработанных интерферограмм составляет $(3 \div 6) \cdot 10^{-2}$ мм $\approx q/20$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hariharan P., Oreb V. F., Brown N. A digital phase measurement system for real-time holographic interferometry.— Opt. Commun., 1982, v. 41, N 6.
2. Ярославский Л. П., Фаянс А. М. Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ.— В кн.: Иконика. Цифровая голография. Обработка изображений. М.: Наука, 1975.
3. Брандт Дж. Голографическая интерферометрия.— В кн.: Оптическая голография. М.: Мир, 1982, т. 2.
4. Kreis T. M., Kreitlew H. Quantitative evaluation of holographic interference patterns under image processing aspects.— SPIE, 1979, v. 210.
5. Де С. Т., Ким В. Ф., Козачок А. Г., Логинов А. В. Анализ схем регистрации двухдлинноволновых топографических изображений.— В кн.: Голографические измерительные системы. Новосибирск, 1978, вып. 2.
6. Гинзбург Э. С., Гришанов А. Н., Де С. Т. и др. Экспериментальное исследование характеристик спекл-структуры голографических изображений.— В кн.: Системы автоматизации обработки оптической информации. Новосибирск, 1984.
7. Goodman J. W. Statistical properties of laser speckle patterns.— In: Laser Speckle and Related Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

Поступила в редакцию 13 февраля 1986 г.