

11. Kreis T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier transform method // JOSA. Ser. A.— 1986.— 3, N 6.  
 12. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.  
 13. Фриден Б. Вычислительные методы в теории вероятностей и статистике // Компьютеры в оптических исследованиях.— М.: Мир, 1983.

Поступила в редакцию 9 февраля 1987 г.

УДК 621.378.9 : 778.4

С. Т. ДЕ, С. И. ИЛЬНИХ, В. А. ХАНДОГИН  
 (Новосибирск)

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ РАСШИФРОВКА ИНТЕРФЕРОГРАММ  
 НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ПСЕВДОСДВИГОВ.  
 Ч. II. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ**

В работе рассмотрены наиболее важные особенности нескольких вариантов гомоморфной фильтрации поля яркости интерферограмм, алгоритмы которых представлены в [1]. Основные выводы получены путем расшифровки нескольких тестовых картин полос. Для объяснения выбранного подхода отметим следующее. Анализ отдельных примеров интерферограмм, разумеется, дает лишь частные выводы. Из теории статистических критериев известно [2], что всегда можно найти пример, подтверждающий ложные выводы или отвергающий истинные. Поэтому и анализ отдельных частных случаев, как правило, не дает общих результатов. Исключение составляет лишь перебор всех возможных вариантов, который здесь неосуществим. При формальном подходе нетрудно свести рассматриваемые нелинейные фильтры к линейным, учитывая свойства гомоморфизма. Однако весь набор возможных выводов, который может быть получен таким образом, во-первых, подробно изучен в общей теории цифровых фильтров [3], а во-вторых, не гарантирует высокой точности расшифровки интерферограмм. Не располагая другим общим подходом к исследованию нелинейных фильтров, авторы по традиции обращаются к анализу частных случаев. При этом особое значение приобретает выбор минимального, но представительного набора типичных картин интерференционных полос, достаточно полно отражающего разнообразные практические ситуации. Насколько нам известно, в литературе нет единой точки зрения по этому поводу, и каждый исследователь синтезирует свою оригинальную систему полос, что не позволяет сравнивать между собой разные алгоритмы. Учитывая изложенное, рассмотрим три типа тестовых интерферограмм, соответствующих следующим полям фазы  $\Phi(x, y)$ .

1. Линейное поле фазы:  $\Phi_1(x, y) = \Phi_0 + k_1 x$  ( $\Phi_0, k_1 = \text{const}$ ), которое приводит к наиболее простой системе полос и последующим предельным оценкам минимального уровня погрешности расшифровки.

2. Половина квадратичной параболы:  $\Phi_2(x, y) = \Phi_0 + k_2 x^2$  ( $k_2 = \text{const}, x \geq 0$ ). Это один из трудных примеров расшифровки с сильной нелинейностью в окрестности вырожденной особенности параболического типа.

3. Сложное распределение фазы, объединяющее два других типа особенностей (эллиптический и гиперболический), которые в приложениях часто встречаются вместе друг с другом. Это также трудный пример для расшифровки:

$$\Phi_3(x, y) = k_3 \left[ \sqrt{\left(\frac{y-b/2}{a/3}\right)^2 + \left(\frac{x-a/4}{a/4}\right)^2} - \left(\frac{x-a/4}{170b/256}\right)^3 \right]; \quad (1)$$

$$k_3 = \text{const}; \quad x \in [0, a]; \quad b \in [0, b].$$

Таким образом, предложенные три типа картин полос содержат самые простые и самые сложные, по нашему мнению, системы линий, ко-

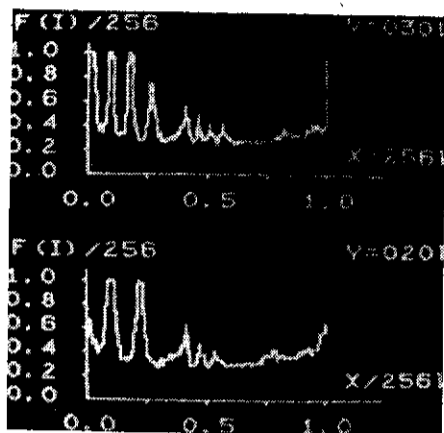


Рис. 1. Профиль нормализованной плотности почернения типичной интерферограммы «среднего» качества в среднем сечении

которые включают все три характерные особенности поля фазы. В последующем наиболее перспективные последовательности алгоритмов гомоморфной фильтрации выделяются по результатам расшифровки указанных тестовых интерферограмм.

**Качество интерферограммы и погрешность ее расшифровки.** В принятой модели поля яркости (см. [1, формула (1)] качество интерферо-

граммы определяется диапазоном вариаций двух основных параметров: средней яркости  $A(x, y)$  и контраста полос  $V(x, y)$ . Идеальные интерферограммы имеют постоянный средний уровень яркости и единичный контраст. Типичные интерферограммы диффузно отражающих объектов, с которыми часто приходится иметь дело в исследовательской и производственной практике, значительно хуже идеальных (рис. 1). Кроме низкочастотной составляющей, шумы этих интерферограмм содержат и высокие частоты. Как было показано ранее [1], гомоморфные фильтры подавляют только низкочастотные составляющие шумов. Соответствующие плавные вариации основных параметров интерферограмм «среднего» качества происходят, как правило, в следующих диапазонах:

$$\frac{\min A(x, y)}{\max A(x, y)} \cong 0,1 - 1; \quad \frac{\min V(x, y)}{\max V(x, y)} \cong 0,3 - 1. \quad (2)$$

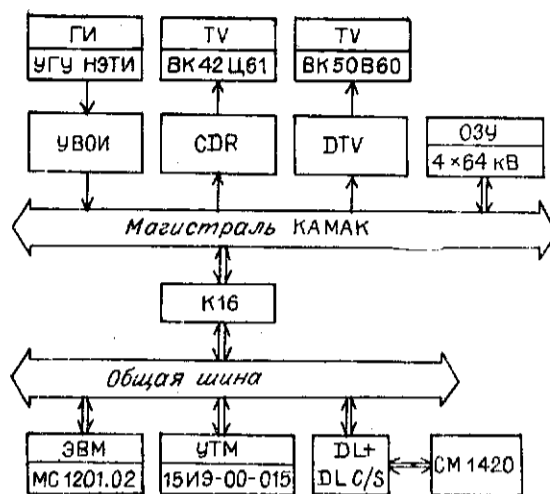
При автоматизированной расшифровке интерферограмм на ЭВМ анализируется не исходное поле яркости, а его цифровой образ, формируемый с помощью устройства ввода. Эквивалентный фильтр процесса ввода ассоциирует с пространственной дискретизацией и квантованием по уровню яркости исходного непрерывного поля  $I(x, y)$ . Каждый из этих двух факторов влияет на точность воспроизведения характерных особенностей интерферограммы в ее цифровом образе и ограничивает точность решения задачи расшифровки. Пренебрегая влиянием высокочастотных шумов, можно получить оценки для предельных уровней погрешности восстановления фазы интерференционной картины по цифровому образу ее поля яркости, которые имеют стандартный вид. При согласованном вводе погрешности из-за пространственной дискретизации и квантования по уровню должны быть одинаковы, что в конечном счете приводит к взаимосвязи шага дискретизации  $l$  и количества градаций яркости цифрового образа. Для наглядности удобно принять в качестве меры погрешности расшифровки погрешность восстановления середины полос (т. е. изофазных линий вида  $\Phi(x, y) = n\pi$ ;  $n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$ ). Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательные соотношения

$$\min N \geq \frac{\max A \max V}{\min A \min V} \frac{2}{1 - \cos(2\pi l/h)}; \quad |\delta h| \leq l, \quad (3)$$

где  $h, \delta h$  — шаг полос (определяемый как локальный период (полупериод) поля яркости) и его погрешность соответственно;  $l$  — шаг дискретизации;  $N$  — количество разрешимых градаций яркости. Из оценок (3) следует, в частности, что для расшифровки интерферограммы «среднего» качества (2) с погрешностью  $|\delta\Phi(x, y)| \leq \pi/5$ , т. е.  $|\delta h/h| \leq 0,1$ , необходимо осуществить ввод в ЭВМ с шагом  $l \leq 0,1h$  при 8-разрядной оцифровке яркости, а снижение допустимой погрешности в 2 раза требует осуществления ввода с шагом  $l \leq 0,05h$  при 10-разрядной оцифровке.

Таким образом, применение автоматизируемых алгоритмов расшиф-

Рис. 2. Структурно-функциональная схема использованного варианта измерительной системы



ровки возможно лишь при жестких ограничениях на характеристики фотометрирующих устройств ввода оптической информации. Промышленные устройства ввода не всегда отвечают ограничению (3), что дополнительно усложняет задачу расшифровки. Рассмотрим предельную ситуацию, когда необходимо расшифровать двухуровневую картину полос,

получаемую из идеальной интерферограммы ( $V = 1, A = \text{const}$ ) с помощью одnorазрядной оцифровки яркости. В строгой и согласованной постановке эта задача не может быть решена с помощью описанного алгоритма гомоморфной фильтрации, так как профили полос имеют прямоугольный, а не косинусоидальный вид, что, в частности, не позволяет определить положения середин полос. Исключения составляют интерферограммы, для которых вариации шага полос достаточно малы. В этом случае для расшифровки можно как вариант искусственно повысить разрядность представления цифрового образа поля яркости и выполнять преобразования в масштабе, например, 8-разрядных чисел, удовлетворяющих (2). Требуемые плавные профили полос косинусоидального типа получаются из прямоугольных путем осреднения с треугольной маской.

**Аппаратура.** Для реализации предложенных методов расшифровки использована голографическая измерительная система с вычислительным комплексом на базе микроЭВМ типа MC 1201.02 (рис. 2). Измерительная система включает универсальную голографическую установку (УГУ НЭТИ), электромеханическое устройство ввода оптической информации (УВОИ), цветной и черно-белый телевизоры с приводами (CDR и DTV), оперативное запоминающее устройство объемом  $64 \text{ Кбайт} \times 4$  зоны (ОЗУ), микроЭВМ, управляющий терминал (УТМ) и канал связи с базовым вычислительным комплексом CM 1420.

Ввод, хранение, отображение и преобразования оптической информации осуществлялись фрагментами размером  $256 \times 256$  элементов разрешения при 256 градациях яркости. Шаг дискретизации  $l$  выбирался кратным  $50 \text{ мкм}$  в зависимости от шага полос  $h$ . Из оценок (3) следует, что при естественном для 8-разрядной оцифровки ограничении погрешности шага полос 10 %-ным уровнем указанные фрагменты интерферограмм «среднего» качества (2) могут содержать до 20–25 интерференционных полос.

Отметим, что приведенная на рис. 2 схема голографической измерительной системы включает вычислительный комплекс, составленный из стандартных элементов промышленного производства, которые обеспечивают потребности количественного анализа интерферограмм лишь на самом минимальном уровне. В настоящее время отечественная аппаратная база позволяет реализовать намного более совершенные вычислительные комплексы для голографических измерительных систем. Это открывает реальные возможности для разработки и внедрения новых методов неразрушающих испытаний при условии активного развития специализированного программного обеспечения.

**Программное обеспечение.** Специфическое программное обеспечение голографической измерительной системы включает четыре основные части. Во-первых, управляющие программы, обеспечивающие ввод оптиче-

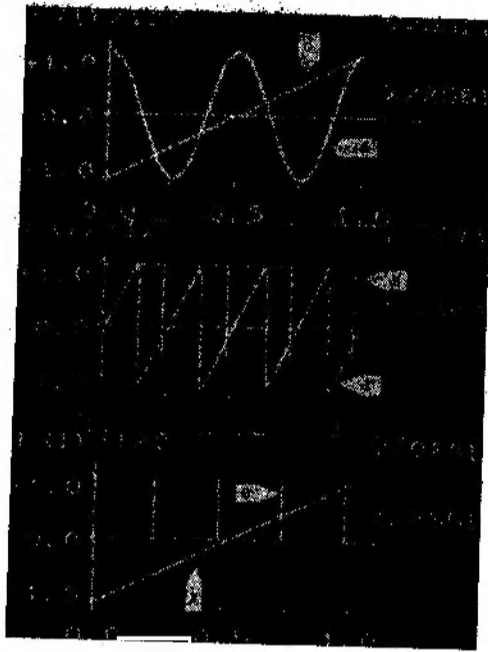


Рис. 3. Профили интерференционных полос (а), соответствующие линейному распределению фазы (б), и результаты гомоморфной фильтрации яркости: график  $\cos \Delta\Phi$  (с),  $\varphi$  (д), полной фазы  $\Phi$  (е) и приведенной относительной погрешности  $\delta\varphi$  (е)

ской информации в ЭВМ и ее обмен между устройствами вычислительного комплекса. Во-вторых, программы визуализации введенных или получаемых при обработке массивов информации. Визуализация осуществляется путем воспроизведения массивов в виде эквивалентных картин яркости на экранах телемониторов либо в виде одномерных или плоских графиков. В-третьих, комплекс программ, реализующих гомоморфный фильтр поля яркости. В-четвертых, программы, обеспечивающие

режим экранного редактирования изображений на любой стадии преобразования оптической информации. Две последние части программного обеспечения выполнены в виде программной надстройки над управляющими и визуализирующими программами.

В целом разработанный комплекс программ образует законченный по архитектуре и достаточно универсальный каркас программного обеспечения по автоматизированной расшифровке интерферограмм, который может служить основой для различных специализаций в зависимости от конкретных особенностей прикладных задач таких, как неразрушающий контроль, анализ формы, контроль оптики, исследование собственных форм колебаний и т. д.

**Расшифровка интерферограммы с линейным полем фазы.** Интерферограмма, соответствующая линейному распределению фазы (рис. 3, а, б), является предельно идеализированной. Ее расшифровка позволяет получить наиболее оптимистические оценки метрологических характеристик алгоритмов. В качестве меры погрешности расшифровки естественно выбрать относительную приведенную погрешность вида

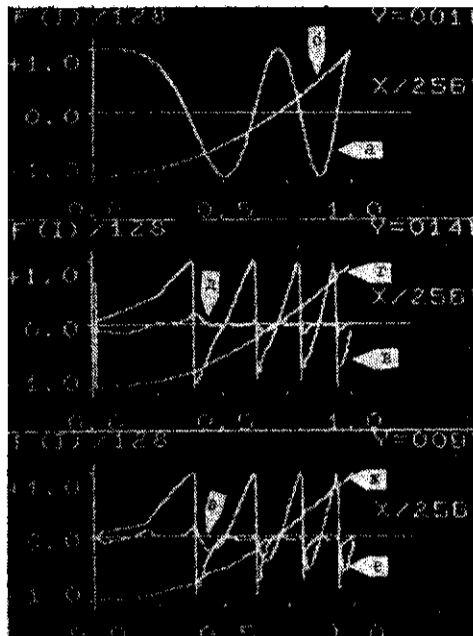
$$\delta\varphi = \frac{2}{\pi} (\varphi - \varphi_0); \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \Psi_0 \pmod{\pi}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — главное значение фазы, восстановленное при расшифровке;  $\varphi_0$ ,  $\Psi_0$  — главное и полное значения точного поля фазы. Соотношение (4) определяет погрешность расшифровки, накопленную на интервале длиной  $\pi$ , в долях  $1/4$  цены интерференционных полос. При расшифровке интерферограммы с линейной фазой получены следующие выводы.

1. Все формулы для расчета значений  $\cos \Delta\Phi$  и  $\varphi = \Phi \pmod{\pi}$  дают идентичные результаты при любых базах фильтрации, равной расстоянию между двумя смежными отсчетами яркости ( $I_l$  и  $I_{l+1}$ ) в разрешающих соотношениях. На рис. 3, с, г представлены указанные функции, определенные при базе, равной  $4l$  ( $l$  — шаг пространственной дискретизации).

2. Расчеты  $\cos \Delta\Phi$  в точках экстремумов яркости, т. е. в серединах интерференционных полос, где  $I' = 0$ , дают очень большие ошибки из-за погрешности квантования по уровню (рис. 3, с), которые во всех случаях имеют вид резких локализованных выбросов. В остальных точках  $\cos \Delta\Phi = \text{const}$ ,  $\Delta\Phi = 11,3^\circ$ .

Рис. 4. Результаты расшифровки интерферограммы (а), соответствующей фазе в виде квадратичной параболы (б), для базы фильтра, равной  $4l$  (в—д) и  $8l$  (е—з): графики  $\Phi$  (в) и (е),  $\Phi$  (з) и (ж),  $\delta\Phi$  (д) и (з)



3. Главное значение фазы (рис. 3, з) точно соответствует линейной функции во всех точках, кроме середины полос, в которых оно повторяет резкие локальные выбросы поля  $\cos \Delta\Phi$ . Это наглядно видно по графику относительной погрешности (4), представленному на рис. 3, е.

4. Локальный характер выбросов позволяет сгладить их стандартными приемами [3], поэтому график полной фазы (рис. 3, д) соответствует точной линейной функции с погрешностью не выше погрешности квантования.

**Расшифровка интерферограммы с квадратичным полем фазы.** Указанный тип тестовой картины полос отличается сильной нелинейностью поля фазы и значительными изменениями шага полос (рис. 4, а, б). При ее расшифровке не все формы гомоморфного фильтра дают одинаковые результаты. Погрешность восстановления фазы для разных форм фильтра отличается почти в 2 раза. Наиболее точной и устойчивой (по отношению к изменениям базы фильтрации) оказалась симметричная форма, представленная в [1] соотношениями (4), (5). Для нее получены следующие выводы.

1. При базе фильтра, равной  $4l$ , фазовый псевдосдвиг изменяется в диапазоне  $0 \leq \Delta\Phi \leq 23^\circ$ , линейно возрастая с увеличением координаты  $x$ . Как показали расчеты, это наилучшее среднее значение базы (рис. 4, в—д). При увеличении (рис. 4, е—з) или уменьшении базы фильтра результаты расшифровки в среднем ухудшаются.

2. Наибольшего значения погрешность  $\delta\Phi$  достигает в окрестности  $\Phi_2 = \pi/2$ , где  $\delta\Phi \leq \pi/10$  (см. рис. 4, д).

3. При увеличении базы фильтра усиливается влияние нелинейности фазы и резко возрастают погрешности, обусловленные второй гипотезой о кусочной линейности фазы [1] (см. рис. 4, е, з). По этой причине целесообразно согласовывать базу фильтра с шагом полос.

**Третий сложный пример расшифровки интерферограммы фазового объекта.** Результаты исследования предыдущих двух примеров показывают, что решение задачи расшифровки целесообразно разбить на несколько этапов, выполнение которых непрерывно визуализируется на экранах телемониторов. Наиболее полный список указанных этапов включает следующее.

1. Оптимальный ввод оптической информации в ЭВМ с выполнением условий (3) (рис. 5, а).

2. Выделение подфрагментов во введенном изображении и задание в них направлений и баз фильтрации. Необходимость фрагментирования изображения вытекает из анизотропии гомоморфного фильтра и неоднородности фазы интерференционных полос. В принципе указанный этап допускает полную автоматизацию, например, на основе анализа гистограммы градиента яркости. Однако это приведет к неоправданно большим затратам времени. Поэтому фрагментирование и ввод лучше осуществлять вручную, что на практике сводится к заданию от 2 до 50 одно-

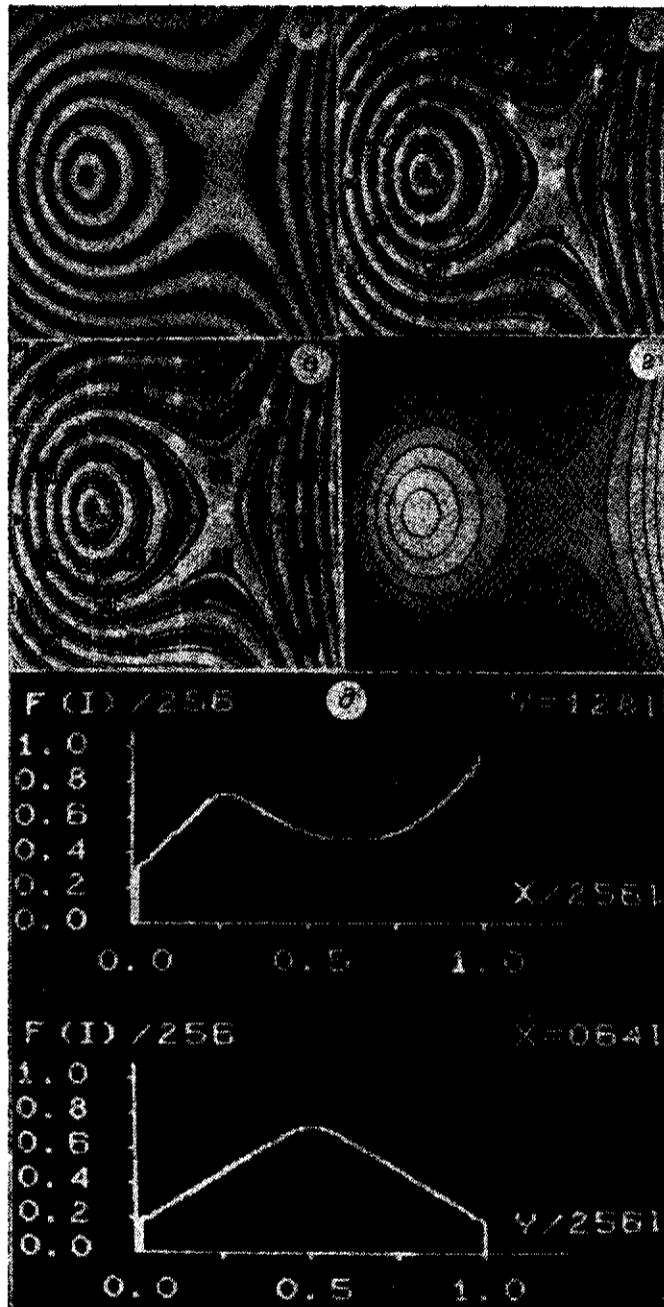


Рис. 5. Расшифровка модельной интерферограммы фазового объекта:  
*a* — исходная картина полос; *b* — значение базы фильтра; *c* — направление фильтрации; *d* — фаза интерференционной картины и *e* — ее графики в двух сечениях

значных чисел с эффективным визуальным контролем (рис. 5, б, в).

3. Выделение середины интерференционных полос и их трехуровневая раскраска по формулам (16), (17) из [1].

4. Реконструкция кусочно-постоянной составляющей полной фазы  $\Phi_r(x, y) = \pi \text{int}(\Phi(x, y)/\pi)$  между серединами полос по правилу (18) из [1].

5. Реконструкция полной фазы с помощью сглаживания ступенек кусочно-постоянной составляющей фазы.

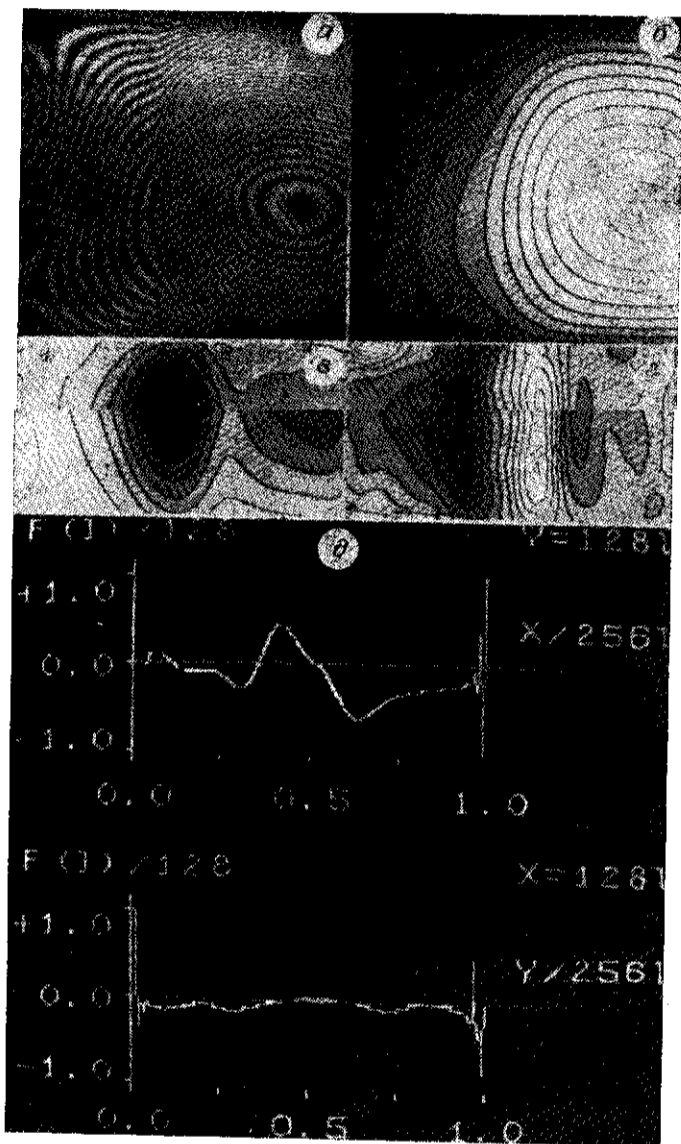


Рис. 6. Расшифровка реальной интерферограммы цилиндрической оболочки под давлением:  
 а — исходная картина полос; б — полутоновая картина поля фазы и ее первой (в) и второй (г) производных вдоль оси  $ox$ ; д — графики второй производной в двух типичных сечениях

6. Оптимизация локальной базы фильтра путем задания ограничений на допустимые значения фазового псевдосдвига.
7. Расчет массива  $\cos \Delta\Phi$  и его сглаживания устранением выбросов, обусловленных погрешностью квантования уровня яркости интерферограммы.
8. Расчет массивов  $\varphi$ ,  $A$ ,  $V$  по формулам (4) — (7) из [1].
9. Расчет полной фазы по естественному правилу  $\Phi = \varphi + \Phi_r$ .

10. Расчет массивов первой или второй производной поля фазы. Этот этап реализуется двумя путями. С одной стороны, при известной полной фазе  $\Phi(x, y)$  ее можно дифференцировать по стандартным правилам. С другой стороны, производные фазы получают, минуя процесс реконструкции фазы, на основе следующего правила приближенного дифференцирования:

$$\frac{\partial}{\partial x} \Phi(\tilde{x}, y) = (2\pi/h_x), \quad \tilde{x} \in [x_1, x_2]; \quad (5)$$

$$h_x \equiv x_2 - x_1; \quad \Phi(x_2, y) = \Phi(x_1, y) + 2\pi,$$

которое дает хорошие результаты при большом (более 20) количестве полос на интерферограмме, когда условие (3) не выполнено.

11. Наглядное представление результатов расшифровки в виде эквивалентных полутоновых картин или графиков на экранах телемониторов и документирование данных.

Наиболее быстрой и достаточно точной при большом количестве полос (более 20) является следующая последовательность преобразований интерферограммы:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 11. \quad (6)$$

При оптимальном в смысле оценки (3) количестве полос перспективна следующая последовательность преобразований:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11; \quad (7)$$

$$\downarrow \quad \uparrow$$

$$5 \rightarrow 6 \rightarrow 8$$

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11. \quad (8)$$

$$\downarrow \quad \uparrow$$

$$6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$$

На рис. 5 представлены результаты расшифровки тестовой интерферограммы фазового объекта (см. рис. 5, а) с помощью последовательности (7). Полное время расшифровки с определением поля фазы и ее первой и второй производных не превышает 15 мин (отметим, что программы гомоморфной фильтрации были написаны на языке Фортран-IV). Погрешность  $\delta\phi$  реконструкции поля  $\phi(x, y)$  не превышает  $\pi/10$  во всей области интерферограммы, что соответствует 2%-й погрешности полной фазы.

**Пример расшифровки интерферограммы шероховатого объекта.** В качестве примера реальной интерферограммы «среднего» качества (рис. 6, а) выбрана реальная интерферограмма, полученная в экспериментах по исследованию композитных цилиндрических оболочек переменной жесткости при нагружении внутренним давлением. Средняя яркость и контраст значительно флуктуируют по полю интерферограммы (см. рис. 1), а количество полос намного превосходит ограничения условия (3). Расшифровка осуществлялась по последовательности преобразований (6). Полное время обработки не превышало 10 мин при дифференцировании по правилам (5). В рассматриваемом случае фаза (рис. 6, б) представляет собой прогиб оболочки, вызванный изменением внутреннего давления, первая производная — осевое перемещение (рис. 6, в), а вторая — осевую изгибную деформацию (рис. 6, г, д). Данные количественной расшифровки визуализируют зоны концентрации деформаций и позволяют обеспечить достаточно достоверный контроль качества изготовления цилиндрической оболочки.

#### ВЫВОДЫ

Проверка алгоритмов осуществлена на данным расшифровки нескольких типов тестовых интерферограмм. Предложен минимальный набор трудных для расшифровки систем линий, который позволяет выявить все существенные особенности новых алгоритмов.



Даны рекомендации о соотношении между предельной погрешностью расшифровки, шагом дискретизации и числом градаций яркости в цифровом образе интерферограммы (3).

Описан использованный программно-аппаратный комплекс голографической измерительной системы, реализующий расшифровку интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов.

Выделены основные этапы преобразований оптической информации, а также наиболее перспективные последовательности этих преобразований (5) — (8).

Примеры расшифровки (см. рис. 3—6), осуществленной по разным последовательностям, подтверждают высокую производительность и точность разработанных алгоритмов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанов А. Н., Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. I: Анализ и алгоритмы // Автометрия.— 1989.— № 1.
2. Ваг дер Варден Б. Л. Математическая статистика.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 28 сентября 1987 г.

УДК 621.372.8

А. В. ЛОГИНОВ, М. Я. МЕЩ, И. М. ОВЧИННИКОВ,  
А. Л. ШЛИФЕР, Г. А. ЮДИН  
(Новосибирск — Ташкент)

#### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Решение задачи определения координат движущегося объекта имеет большое практическое значение для различных областей науки и техники: экспериментальной механики, биомедицинских и метеорологических исследований, промышленной роботизации, автоматизации производства и т. д.

Большинство известных в настоящее время алгоритмов решения задачи слежения основаны на программной реализации [1—3]. В данной работе приводится описание гибридного специализированного вычислителя для слежения за поступательным движением двумерного объекта на основе волоконно-оптической линии задержки.

Для решения задачи слежения был разработан алгоритм, в основе которого лежат две операции — задержка сигнала и определение совпадения двух сигналов (логическое И). Отметим, что вторая операция достаточно просто и быстро реализуется с помощью электроники. Задержка же сигнала, особенно высокочастотного, на большие временные интервалы является весьма сложной задачей для традиционной электроники, но легко осуществима в волоконно-оптических линиях задержки [4].

Суть предложенного алгоритма состоит в том, что из поступающего в виде бинарной последовательности импульсов первого кадра формируется девять кадров-эталонов, соответствующих элементарному поступательному смещению изображения объекта в плоскости кадра по вертикали (два эталона), горизонтали (два эталона), диагонали (четыре эталона) и отсутствию смещения (один эталон). С каждым из девяти