

4. Гай Е. Н. Almost Uniform Distribution for Computer Image Enhancement.— IEEE Trans. on Computers, 1974, vol. C-23, N 2, p. 207—208.
5. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. М., Мир, 1972.
6. Werner F. Image Enhancement by Histogram Hyperbolization.— Computer Graphics and Image Processing, 1977, vol. 6, N 3, p. 286—294.
7. Ярославский Л. П. Анализ оптимальных линейных измерителей координат объектов на изображениях.— Вопросы кибернетики, 1978, вып. 38, с. 32—49.
8. Великова Т. П., Кронрод М. А., Чочна П. А., Ярославский Л. П. Цифровая обработка фотоснимков поверхности Марса, переданных АМС «Марс 4» и «Марс 5».— Иосм. исследования, 1975, т. 13, № 6.
9. Векштейн И. М., Ярославский Л. П. Дисплейный процессор для автоматизированных систем цифровой обработки изображений.— Автометрия, 1980, № 3.
10. Великова Т. П. Исследование некоторых методов цифрового преобразования изображений.— В кн.: Цифровая обработка изображений. М., Наука, 1980.
11. Kinime C., Sklansky J. Medically Significant Features Image Display.— In: Proc. of the Symposium on Computeraided Diagnosis of Medical Images, Coronado, California, nov. 11, 1976.
12. Кронрод М. А. Несколько задач обработки изображений.— Вопросы кибернетики, 1977, вып. 38.
13. Великова Т. П., Ярославский Л. П., Джанчаров Д. П. и др. Использование ЭВМ для выделения некоторых патологических изменений на маммограммах.— В кн.: Материалы межотраслевой конференции. Новая техника в медицинской практике. М., изд. СММН им. Н. М. Сеченова, 1978.

Поступила в редакцию 27 августа 1979 г.

МШ. 42. 07. 001. 015

А. Н. УШАКОВ
(Москва)

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ НА ЭВМ

Введение. Задача автоматической обработки интерферограмм возникает в связи с расширением объема исследований и повышением требований к точности восстановления фазы интерферограмм. Автоматизация процесса обработки позволяет с высокой точностью восстанавливать фазу в каждой точке поля, что практически невозможно вручную, а также проводить дальнейшую обработку полученных результатов.

В настоящее время существует несколько подходов к автоматической обработке интерферограмм. Первый заключается в анализе нескольких интерферограмм объекта, полученных при различных соотношениях фаз между двумя произвольными точками опорного и исследуемого волновых фронтов [1, 2]. Такой подход позволяет проводить обработку с высокой точностью за очень короткое время, но требует внесения изменений в схему интерферометра. Второй состоит в восстановлении фазы по единственной интерферограмме, обычно регистрируемой на промежуточном носителе [3—13]. Он обладает большей универсальностью, так как позволяет проводить обработку интерферограмм, снятых на различных интерферометрах, а также анализ быстропротекающих процессов и процессов, разделенных во времени и в пространстве (голографическая интерферометрия). Его недостаток состоит в большем времени обработки интерферограммы.

Обработка интерферограмм, зарегистрированных на промежуточном носителе, ведется несколькими способами в зависимости от их структуры. Интерферограммы, линии равной фазы которых представляют почти прямые линии с эквидистантно расположенными интерференционными экстремумами, обрабатываются по сечениям аналоговыми средствами или на ЭВМ [6, 8—10]. Другой подход состоит в аппроксимации всей фа-

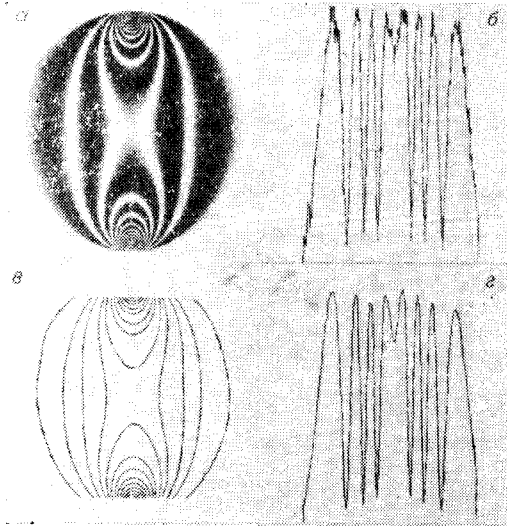


Рис. 1.

сложной структурой на ЭВМ для интерферограмм, зарегистрированных на промежуточном носителе. Интерферограмма предполагается введенной в ЭВМ с помощью устройства фотоввода. В ЭВМ она представляется в виде отсчетов значений относительной оптической плотности, заданных на дискретном растре. Обработка сложных интерферограмм на основе анализа сечений дана в [3, 5]. В [4] рассмотрен вопрос восстановления фазы на сложных интерферограммах в случае, когда расстояние между соседними интерференционными экстремумами почти не изменяется по полю интерферограммы. Восстановление проводится на основе выделения линий интерференционных экстремумов и интерполяции фазы между линиями. В настоящей статье изучается вопрос построения двумерного фильтра (фильтра с импульсной реакцией, заданной на двумерной области) с переменными параметрами для оценки идеальной интерферограммы по зашумленной на основе анализа локальной структуры интерферограммы. Проводятся фильтрация низкочастотных шумов и восстановление фазы интерферограммы. Оценивается погрешность восстановленного значения фазы.

1. Описание интерферограммы и схема ее восстановления. На рис. 1, а, б представлены интерферограмма, введенная в ЭВМ, и график ее сечений. Анализ этой, а также других интерферограмм показывает, что зарегистрированную интерферограмму в первом приближении можно описать в виде

$$\begin{aligned}
 I_p(x, y) &= F\{I_m(x, y)\} + N_1(x, y)[1 + \beta(F\{I_m(x, y)\})]; \\
 I_m(x, y) &= I_n(x, y)(1 + N_2(x, y)) + N_3(x, y); \\
 I_n(x, y) &= A(x, y) \cos \Phi(x, y) + b(x, y) + B; \\
 A(x, y) &= A_0(1 + a(x, y)),
 \end{aligned}$$

где $\Phi(x, y)$ — фаза интерферограммы, подлежащая измерению; A_0 и B — амплитуда и постоянная составляющая интерферограммы; $a(x, y)$ и $b(x, y)$ — шумы, более низкочастотные, чем функция $\cos \Phi(x, y)$ (НЧ-шумы); N_1, N_2, N_3 — широкополосные шумы со средним нулевым значением; $F\{ \}$ — функция, описывающая нелинейные искажения регистратора; β — зависимость шума регистратора от уровня регистрируемого сигнала. Широкополосные шумы визуально кажутся высокочастотными, и в дальнейшем их предлагается называть высокочастотными шу-

зой поверхности полиномом. Он применяется для интерферограмм с достаточно простой структурой (интерферограммы с линиями равной фазы, представляющие почти прямые линии; интерферограммы с круговой симметрией) [11—13]. В работе [3] для восстановления интерферограмм предлагается поэтапный метод. Он заключается в оценке «идеальной» интерферограммы по наблюдаемой зашумленной с последующей оценкой фазы идеальной интерферограммы. Поэтапный метод применяется, как правило, для интерферограмм со сложной структурой.

В настоящей статье будет рассмотрен вопрос восстановления фазы интерферограмм со

мами (ВЧ-шумы). Модель интерферограммы без учета мультипликативных ВЧ-шумов предложена в [3]. Описание различных источников шума интерферометра, фотопленки и устройства ввода можно найти в [3—6, 8—15].

Зарегистрированная интерферограмма представляет собой зашумленный гармонический сигнал, модулированный по фазе. Различные методы детектирования (восстановления) фазы детально разработаны в радиотехнике. Однако они основаны на том, что частота несущего колебания велика по сравнению с наивысшей частотой спектра передаваемого сообщения [16]. Для интерферограмм со сложной структурой это условие часто не выполняется. Другой возможный подход к восстановлению фазы состоит в непосредственной ее оценке по небольшому участку зашумленной интерферограммы, что, однако, является затруднительным, так как при оценке фазы необходимо дополнительно оценивать «амплитуду», «смещение» и частоту интерферограммы, которые медленно меняются по полю. В работе использовался поэтапный метод оценки фазы [3], заключающийся в последовательной коррекции нелинейных искажений, фильтрации ВЧ- и НЧ-шумов и восстановлении фазы. Наибольшие трудности при таком подходе представляет фильтрация ВЧ-шума. Этот вопрос будет подробно изучен ниже. Рассмотрим кратко остальные этапы.

Нелинейные искажения можно скорректировать на основе фотометрического клина, впечатываемого на пленку. В отсутствие клина устранять основные искажения можно, если регистрация происходит на линейном участке характеристической кривой пленки, т. е. если $F\{z\} \approx \gamma \ln z$, где γ — коэффициент контрастности пленки. Для устранения искажений необходимо потенцирование значений оптических плотностей. Показатель экспоненты либо выбирается на основе паспортного значения коэффициента контрастности пленки, либо устанавливается на основе визуального анализа графика сечения интерферограммы. Опцируем интерферограмму после коррекции искажений. В случае когда шум пленки

$$N_{\Phi} = N_1(1 + \beta(F\{I_m\})) \ll \gamma,$$

$$I_{\text{коп}} \approx I_n(1 + n_m(x, y)) + n_a(x, y),$$

где n_a и n_m — аддитивный и мультипликативный ВЧ-шумы:

$$n_a = N_3 + N_2B + N_{\Phi}B/\gamma,$$

$$n_m = (N_2 + N_{\Phi}/\gamma)(A \cos \Phi + b).$$

При выводе формулы члены второго порядка малости не учитывались.

Фильтрацию НЧ-шумов предлагается провести на основе выделения линий интерференционных экстремумов и построения поверхностей огибающих максимумов и минимумов. В качестве оценки $b(x, y) + B$ предлагается принять среднее значение между поверхностями огибающих максимумов и минимумов, а за $A(x, y)$ — их полуразность.

Фаза с точностью до $\pm k\lambda$ восстанавливается функцией \arccos . Абсолютное значение фазы находится на основе анализа линий интерференционных экстремумов. Для определения областей нарушения монотонного возрастания (убывания) фазы проводятся анализ структуры линий (выделение областей, ограниченных одной, двумя и многими линиями интерференционных экстремумов) и сравнение значений интерферограммы на соседних интерференционных максимумах (минимумах). Помимо поточечного сравнения используется сравнение средних значений соседних интерференционных максимумов (минимумов), измеренных по всей линии. В сложных случаях предусмотрен диалоговый режим работы.

2. Фильтрация высокочастотного шума. Назовем идеальной интерферограммой функцию $\cos \Phi(x, y)$. Способы построения фильтра определяются характером сведений о сигнале (идеальной интерферограмме) и шу-

ме. Априорные сведения о сигнале, как правило, отсутствуют. Тогда задача фильтрации должна ставиться как оценка параметров сигнала по зашумленной интерферограмме и построение фильтра на основе измеренных параметров сигнала.

Введем подвижную систему координат $X'O'Y'$ с осью $O'X'$, совмещенной в каждой точке поля с направлением градиента фазы в данной точке. Для оценки параметров сигнала предлагается локальная модель интерферограммы: фазовая поверхность $\Phi(x', y')$ в каждой точке поля в пределах окрестности, линейный размер которой не меньше кратчайшего расстояния между соседними линиями интерференционных экстремумов, описывается поверхностью второго порядка

$$\Phi(x', y') = \omega_y(y')^2 + \omega_x x' + \Phi_0,$$

где Φ_0 — фаза в данной точке поля. В этой модели вдоль направления $O'X'$ сигнал гармонический (в пределах окрестности), а член $\omega_y(y')^2$ учитывает искривление линий равной фазы. Для измерения параметров поверхности предлагается выделять на интерферограмме линии перехода через среднее значение. Частота ω_x оценивается по кратчайшему расстоянию между соседними средними линиями, ω_y — по кривизне ближайшей линии, а ориентация — по направлению касательной к средней линии.

Чтобы построить фильтр, надо задать критерий сходства между сигналом и его оценкой по наблюдаемой смеси сигнала и шума, рассчитать вид фильтра и оценить его параметры. Исходя из этой задачи, за критерий следует принять степень близости между значением фазы и ее оценкой по зашумленной интерферограмме. Однако на оценку фазы, помимо ВЧ-шума, влияют и другие факторы: уровень НЧ-шума, степень отличия интерферограммы от ее модели, точность оценки параметров модели и ряд других. Предлагается вначале в качестве критерия взять критерий минимума дисперсии шума на выходе фильтра. Это упрощает расчет фильтра, но оценка фазы при таком критерии не является оптимальной. По отфильтрованной интерферограмме предлагается оценить неизвестные параметры (уровень НЧ-шума, степень отличия интерферограммы от ее модели и др.) и провести повторную фильтрацию по критерию минимума среднеквадратического отклонения между фазой и ее оценкой. В ряде случаев точность оценки фазы достаточна и при неоптимальном выборе параметров фильтра; тогда потребность в повторной фильтрации отпадает.

Следующий вопрос — это выбор самого фильтра. Для подавления аддитивной компоненты шума предлагается использовать линейный фильтр. Эксперимент показал, что линейный фильтр подавляет и мультипликативный шум. Это связано с тем, что при двумерной фильтрации происходит сглаживание вдоль линий равной фазы, где шум является чисто аддитивным. Кроме того, при малой апертуре фильтра по сравнению с периодом интерферограммы уменьшается сама компонента мультипликативного шума за счет увеличения компоненты аддитивного шума. Исходя из модели, двумерная импульсная реакция линейного фильтра строится на основе одномерной $h_0(x')$ в сечении $y' = 0$. В сечении $y' = \beta$ импульсная реакция равна $h_0(x' + (\omega_y/\omega_x)\beta^2)$. Однако построение фильтра в каждой точке поля с импульсной реакцией, повторяющей изгиб средних линий, связано с большими затратами машинного времени. Поэтому предлагается строить фильтр с прямоугольной апертурой и импульсной реакцией в сечении $y' = \beta$, равной $h_0(x')$. Размер апертуры в направлении $O'Y'$ вычисляется по измеренной кривизне линий.

При построении одномерного линейного фильтра $h_0(x')$ сравнивались два варианта: оптимальный линейный фильтр (ОЛФ) и сглаживающий фильтр с импульсной реакцией $h(\tau) = \alpha = \text{const}$ при $|\tau| \leq \Delta \leq L/2$ и $h(\tau) = 0$ при $\tau > \Delta$ и $\tau < -\Delta$, где L — расстояние между соседними

средними линиями в данной точке поля. Для построения ОЛФ необходимо знать корреляционные функции сигнала и шума. Будем считать, что в пределах апертуры фильтра в первом приближении $I_n(x', y') \approx \cos \omega x'$; тогда в пределах апертуры сигнал имеет гармоническую корреляционную функцию. Эксперименты показали, что корреляционную функцию ВЧ-шума в первом приближении можно считать экспоненциально спадающей. Построение ОЛФ для таких корреляционных функций сигнала и шума в случае, когда для анализа доступны только «настоящее» и «прошлое» смеси сигнала и шума, проведено в [17]. Если помимо «прошлого» нам доступно и «будущее», то можно показать, что $h_0(x')$ ОЛФ описывается отрезком косинусоидальной функции плюс двумя дельта-функциями на границах интервала наблюдения. Дисперсия шума на выходе ОЛФ, если длина интервала наблюдения составляет половину периода интерферограммы и шум на входе белый, равна $2,0 \sigma^2/L$, а на выходе сглаживающего фильтра — $2,17\sigma^2/L$, где σ^2 — дисперсия шума на входе. Для сглаживающего фильтра проигрыш по сравнению с ОЛФ составляет 8,5%, но он компенсируется выигрышем в быстродействии, так как сглаживающий фильтр строится в основном из операций сложения, а ОЛФ — из операций сложения и умножения. Кроме того, эксперименты показывают, что реальный выигрыш от применения ОЛФ намного меньше теоретического. Это объясняется тем, что ОЛФ менее устойчив к погрешностям в оценке параметров модели и к отличию модели от реальной интерферограммы, чем сглаживающий фильтр. С учетом этих факторов выбор был сделан в пользу сглаживающего фильтра. Обозначим через $2\Delta_x$ и $2\Delta_y$ размеры апертуры фильтра в направлениях $O'X'$ и $O'Y'$. Можно показать, что минимум отношения мощностей шум/сигнал на выходе фильтра достигается при $\Delta_x = 1,16/\omega_x$ и $\Delta_y = 1,17/\omega_y$.

3. Точность оценки фазы. На точность оценки фазы, как уже отмечалось ранее, влияют многие факторы. Их можно разбить на четыре группы. К первой отнесем ошибки, вызванные неточным измерением параметров модели. Они приводят к флуктуациям амплитуды и постоянной составляющей сигнала на выходе фильтра. Это ошибка а) в измерении периода интерферограммы, вызванная наличием аддитивного НЧ-шума ($\Delta A_{см}$ и $\Delta B_{см}$) и погрешностью в измерении расстояния между средними линиями, заданными на дискретном растре (ΔA_d и ΔB_d); б) в направлении ориентации фильтра, вызванная погрешностью определения касательной к средней линии, погрешностью, связанной с отличием локального направления средней линии от локального направления линии равной фазы в данной точке поля, и погрешностью, связанной с заданным числом направлений ориентации цифрового фильтра ($\Delta A_{ор}$, $\Delta B_{ор}$); в) в неточном измерении кривизны линий. Ко второй группе отнесем ошибки, связанные с отличием интерферограммы от гармонического сигнала. Они вызваны медленным изменением частоты интерферограммы между соседними средними линиями (ΔA_m), НЧ мультипликативным шумом ($\Delta \Phi_{мл}$) и искривлением линий равной фазы в пределах апертуры фильтра ($\Delta \Phi_{кр}$). Третья группа — это ошибки интерполяции огибающей между экстремальными линиями ($\Delta A_{ин}$, $\Delta B_{ин}$). И, наконец, четвертая группа — это ошибки из-за ВЧ-шума и шума квантования, влияющие как на оценку фазы в каждой точке поля (\tilde{n} и $\tilde{n}_{кв}$), так и на точность оценки амплитуды и смещения интерферограммы ($\Delta A_{\tilde{n},кв}$, $\Delta A_{\tilde{n}}$, $\Delta B_{\tilde{n},кв}$, $\Delta B_{\tilde{n}}$).

Можно показать, что суммарная ошибка в оценке фазы $\Delta \Phi$ записывается в виде

$$\Delta \Phi = \Phi - \arccos [\cos \Phi + \Delta \cos \Phi] + \Delta \Phi_{мл} + \Delta \Phi_{кр}^*,$$

* Расчет показывает, что $\Delta A_{см} = \Delta B_{см}$, $\Delta A_d = \Delta B_d$, $\Delta A_{\tilde{n}} = \Delta B_{\tilde{n}}$; $\Delta A_{\tilde{n},кв} = \Delta B_{\tilde{n},кв}$. Это находит отражение в выражении для M_1 .

где $\Delta \cos \Phi = M_1(1 + \cos \Phi) + M_2 \cos \Phi + M_3$;

$$M_1 = (\Delta A_{\text{см}} + \Delta A_{\text{д}} + \Delta A_{\tilde{n}} + \Delta A_{\tilde{n}, \text{нв}})/A; \quad (1)$$

$$M_2 = (\Delta A_{\text{м}} + \Delta A_{\text{ор}} + \Delta A_{\text{ин}})/A;$$

$$M_3 = (\tilde{n} + \tilde{n}_{\text{нв}} + \Delta B_{\text{ор}} + \Delta B_{\text{ин}})/A.$$

Исключим области, где $|\cos \Phi| \approx 1$, и предположим, что $\Delta \cos \Phi \ll 1$, тогда (1) можно записать в виде

$$\Delta \Phi \approx \Delta \Phi_{\text{мл}} + \Delta \Phi_{\text{кр}} + \Delta \cos \Phi / \sin \Phi.$$

Расчет показывает, что средние значения ошибок $\Delta A_{\text{см}}, \dots, \Delta B_{\text{ин}}, \Delta \Phi_{\text{мл}}$ по всему полю интерферограммы, как правило, меньше их стандартных отклонений. Проведем расчет дисперсии суммарной ошибки. Будем считать, что линии равной фазы слабо искривлены в пределах апертуры фильтра. Тогда в направлении $O'Y'$ компонента мультипликативного шума становится малой и ее в первом приближении можно не учитывать в отличие от компоненты в направлении $O'X'$. Предположим, что ВЧ-шум некоррелирован, значения периода интерферограммы по всему полю наблюдения равномерно распределены на $(T_{\text{н}}T_{\text{к}})$, а значения $b(x, y)/A(x, y)$ — на интервале $(-(b/A)_{\text{н}}, (b/A)_{\text{м}})$; отношение изменения периода в промежутке между соседними средними линиями ΔT к периоду интерферограммы в каждой точке поля T постоянно по полю наблюдения, и $\Delta T/T \ll 1$; мультипликативный и аддитивный НЧ-шумы в сечении $O'X'$ описываются выражениями $a(x') = m \cos \Omega_1 x'$ и $b(x') = u \cos \Omega_2 x'$, $u < 1$, $m \approx 1$, $\Omega_1 \in (\varphi_{\text{н}}, \varphi_{\text{к}})$, и кривизна линий не меняется по полю наблюдения. Возьмем в качестве интерполяции огибающих линейную интерполяцию. Можно показать, что в этом случае дисперсия ошибки в оценке фазы

$$\sigma_{\Phi}^2 = \left[\sigma_{M_1}^2 (1 + \cos \Phi)^2 + \sigma_{M_2}^2 \cos^2 \Phi + \sigma_{M_3}^2 \right] \sin^2 \Phi + \sigma_{\text{мл}}^2 + \sigma_{\text{кр}}^2,$$

где

$$\sigma_{M_1}^2 = A_0^2 R \left[\frac{4}{3\pi^2} (b/A)_{\text{м}}^2 + \frac{1}{12T_{\text{н}}T_{\text{к}}} \right] + 1/3 (\sigma_{\tilde{n}}^2 + \sigma_{\tilde{n}, \text{нв}}^2);$$

$$\sigma_{M_2}^2 = A_0^2 R T^2 \left[\frac{1}{T^2 - \Delta T^2} - \frac{1}{(2\Delta T)^2} \ln^2 \frac{T + \Delta T}{T - \Delta T} \right] + \sigma_{\text{ин, А}}^2 + \sigma_{\text{ор, А}}^2; \quad (2)$$

$$\sigma_{M_3}^2 = \sigma_{\tilde{n}}^2 + \sigma_{\tilde{n}, \text{нв}}^2 + \sigma_{\text{ор, В}}^2 + \sigma_{\text{ин, В}}^2;$$

$$\sigma_{\text{мл}}^2 = \frac{1}{4 \sin^2 v} \left(\frac{\sin v (\kappa + 1)}{\kappa + 1} - \frac{\sin v (\kappa - 1)}{\kappa - 1} \right)^2 \times$$

$$\times [2 (\text{tg } \varphi_{\text{к}}/2 - \text{tg } \varphi_{\text{н}}/2) / (\varphi_{\text{к}} - \varphi_{\text{н}}) - 1];$$

$$\sigma_{\tilde{n}}^2 + \sigma_{\tilde{n}, \text{нв}}^2 = \left(\sigma^2 + \frac{1}{12V^2} \right) \frac{1}{S^2(l) + C^2(l)} \frac{\omega_x^2 \sqrt{\omega_x} l \Lambda_x}{2 \sqrt{2} \pi \sin^2 \omega_x \Lambda_x};$$

$$\sigma_{\text{кр}}^2 = \arctg^2 S(l)/C(l);$$

$$R = (1 - \omega_x \Delta_x \text{ctg } \omega_x \Delta_x)^2; \quad v = \omega_x \Lambda_x;$$

$$-\pi < \varphi_{\text{н}} \leq \varphi_{\text{к}} < \pi; \quad \kappa = \Omega_1/\omega_x; \quad l = \Delta_y \sqrt{2\omega_y/\pi};$$

$S(l)$ и $C(l)$ — синусный и косинусный интегралы Френеля; V — число уровней квантования интерферограммы; σ^2 — дисперсия ВЧ-шума на входе сглаживающего фильтра. Аналитические выражения для $\sigma_{\text{ин, А}}^2$ и $\sigma_{\text{ин, В}}^2$ в общем случае в связи с громоздкостью не приводятся. В случае когда Ω_1 и Ω_2 равномерно распределены на $[-\pi/2; \pi/2]$,

$$\sigma_{\text{ин, А}}^2 = 1/2 A_0^2 m^2 [\cos^2 \beta_1 (\cos^4 \beta_1 + 1/12 \sin^2 2\beta_1) - 2 \sin^2 \beta_1 / \beta_1^2 + 1] + 1/2 u^2 \sin^6 \beta_2;$$

$$\sigma_{\text{ин,В}}^2 = 1/2u^2 [\cos^2 \beta_2 (\cos^4 \beta_2 + 1/12 \sin^2 2\beta_2) - 2 \sin^2 \beta_2 / \beta_2^2 + 1] + 1/2A_0^2 \sin^6 \beta_2 m,$$

где $\beta_1 = \pi\Omega_1/2\omega_x$, $\beta_2 = \pi\Omega_2/2\omega_x$. Значения $\sigma_{\text{ор,А}}^2$ и $\sigma_{\text{ор,В}}^2$ по всему полю вычисляются с помощью численных методов. Расчет показывает, что при $0,75\Delta_y \leq \Delta_x \leq 1,5\Delta_y$ ошибку ориентации можно не учитывать даже при двух направлениях ориентации фильтра.

В п. 2 параметры фильтра выбирались из условия минимума отношения мощностей шум/сигнал на выходе фильтра. Для получения наилучшей среднеквадратичной оценки фазы параметры фильтра Δ_x и Δ_y необходимо выбирать из условия минимума выражения (2). В связи с тем, что (2) зависит от Φ , предлагается минимизировать максимальную ошибку, т. е. ошибку при $\Phi \rightarrow 0$. В расчетах использовалось значение $\Phi = \pi/8$. Поиск минимума осуществлялся методом последовательных приближений с начальными значениями $\Delta_x = 1,16/\omega_x$ и $\Delta_y = 1,17\sqrt{\omega_y}$.

4. Эксперименты по восстановлению интерферограмм. Эксперименты по восстановлению проводились на модельной и реальных интерферограммах. В качестве идеальной модельной интерферограммы была взята косинусоидальная функция от поверхности второго порядка (идеальная модельная интерферограмма и график ее сечения приведены в [18]). Мультипликативный НЧ-шум $1+a(x, y)$ задали поверхностью второго порядка, значение которой спадало от единицы в центре интерферограммы до 1/2 на краях. Аддитивный НЧ-шум также был задан поверхностью второго порядка, в первом варианте спадавшей от 0,125 величины амплитуды в центре поля до нуля к краям, а во втором — от 0,25 амплитуды до нуля. На искаженную интерферограмму наносился аддитивный гауссовый белый шум [19], составляющий 5% мощности идеальной интерферограммы, и мультипликативный шум, составляющий 40% мощности аддитивного шума на интерференционных максимумах и 0,3% — на интерференционных минимумах. На зашумленной интерферограмме после предварительного сглаживания ВЧ-шума были выделены средние линии. Для фильтрации ВЧ-шума использовался сглаживающий фильтр с максимальным размером апертуры 17×17 элементов. Были приняты следующие параметры фильтра: $\Delta_x = 0,6/\omega_x$; $\Delta_y = 0,15/\sqrt{\omega_y}$ ($2\Delta_y = 17$ элементов). Для интерполяции огибающих использовалась одномерная линейная интерполяция. Средняя ошибка в оценке фазы ϵ и ее стандартное отклонение, нормированные на π , без учета краевых эффектов составили в первом варианте $1,4 \cdot 10^{-3}$ и $1,70 \cdot 10^{-2}$, а во втором —

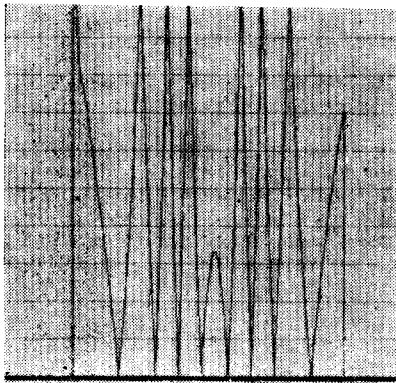


Рис. 2.

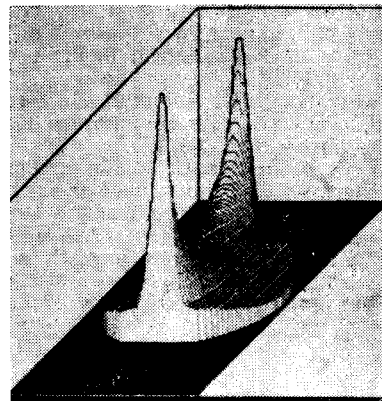


Рис. 3.

$3,4 \cdot 10^{-3}$ и $1,97 \cdot 10^{-2}$. Теоретическая ошибка σ/λ , вычисленная при условии, что Φ распределена равномерно на $[7/8\lambda, 1/8\lambda]$, в первом варианте равна $1,82 \cdot 10^{-2}$ и во втором — $2,07 \cdot 10^{-2}$.

На рис. 1, а, б приведены реальная интерферограмма* и график ее сечения после ввода в ЭВМ (на рис. 1, а это сечение показано черной линией). Вначале на интерферограмме проводилась коррекция нелинейных искажений, затем осуществлено выделение средних линий (рис. 1, в). Для уменьшения ошибок при выделении линий НЧ аддитивный шум предварительно был аппроксимирован поверхностью второго порядка и затем вычтен из сигнала. На рис. 1, г и 2 приведены графики сечения интерферограммы после фильтрации и относительного значения фазы. На рис. 3 изображена перспективная проекция абсолютного восстановленного значения фазы.

Автор выражает благодарность Л. П. Ярославскому за консультации и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Crane R. Interference Phase Measurement.— Appl. Opt., 1969, vol. 8, N 3.
2. Brunning I. H., Herriot D. R., Gallagner I. E. a. o. Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 11.
3. Ярославский Л. П., Фаянс А. М. Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ.— В кн.: Иконика. Цифровая голография. Обработка изображений. М., Наука, 1975.
4. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. М., Энергия, 1976.
5. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Измерение параметров рельефа поверхности методом двухдлинноволновой голографической интерферометрии.— В кн.: Голографические измерительные системы. Новосибирск, изд. НЭТИ, 1976.
6. Душин Л. А., Привезенцев В. И., Таран В. С., Ямницкий В. А. Многоградационная автоматическая обработка оптических интерферограмм плазмы на ЭВМ.— Автометрия, 1974, № 3.
7. Ушаков А. Н. Автоматическая обработка интерферограмм на ЦВМ. (Тезисы докладов Всесоюз. конф.)— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
8. Dyson I. A Rapid Measurement of Photographic Records of Interference Fringes.— Appl. Opt., 1963, vol. 2, N 5.
9. Shamir I., Fox R., Lipson S. G. A Simple Method of Measuring Very Small Fringe Shifts.— Appl. Opt., 1969, vol. 8, N 1.
10. Jones R. A., Kadakia P. L. An Automated Interferogram Analysis Technique.— Appl. Opt., 1968, vol. 7, N 8.
11. Dutton D., Cornejo A., Latta M. A Semiautomatic Method for Interpreting Shearing Interferograms.— Appl. Opt., 1968, vol. 7, N 1.
12. Ган М. А., Устинов С. И., Котов В. В. и др. Обработка интерферограмм на ЭВМ и определение функции рассеяния точки и оптической передаточной функции при контроле и доводке оптических систем.— ОМП, 1978, № 9.
13. Зверев В. А., Агурок Н. П., Родионов С. А., Сокольский М. Н. Автоматизация обработки интерферограмм при контроле оптических систем.— ОМП, 1978, № 9.
14. Brunning I. H., Herriot D. R. A Versatile Laser Interferometer.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, N 9.
15. Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И. Восстановление распределения интенсивности светового потока в считывающем луче сканирующей системы.— Автометрия, 1977, № 3.
16. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., Сов. радио, 1971.
17. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. М., Наука, 1965.
18. Ушаков А. Н. Исследование некоторых адаптивных методов фильтрации шума на интерферограммах.— Автометрия, 1979, № 4.
19. Миркин Л. И., Рабинович М. А., Ярославский Л. П. Метод генерирования коррелированных гауссовых псевдослучайных чисел на ЦВМ.— Журн. вычислит. математики и мат. физики, 1972, № 5.

Поступила в редакцию 6 сентября 1979 г.

* Интерферограмма представлена автору С. А. Литвиным.