10. **Есаян Ю. В., Акопов Р. В., Татевосян Н. Ц., Еганян М. Ж.** О влиянии подогрева на реверсивную запись на халькогенидных пленках As_2S_3 // Письма в ЖТФ.— 1975.— Т. 1, вып. 5.
11. **Туреница И. И., Семак Д. Г., Кикинеши А. А.** Об оптимизации параметров халькогенидных слоев для оптической записи // Журн. научн. и приклад. фотогр. и кинематогр.— 1977.— № 22.
12. **Андриеш А. М., Быковский Ю. А., Смирнов В. Л. и др.** Фотоприемные элементы и дифракционные решетки рельефного типа в тонких пленках As_2S_3 для интегральной оптики // Квантовая электрон.— 1978.— Т. 5, № 5.
13. **Звонарева Т. К., Коломиец Б. Т., Любин В. М., Федоров В. А.** Фотостимулированные изменения оптических свойств и запись оптической информации в стеклообразных пленках системы As — S // ЖТФ.— 1978.— Т. 48, № 5.
14. **Коломиец Б. Т., Любин В. М., Шило В. П.** Фотостимулированные изменения растворимости халькогенидных стекол // Физика и химия стекла.— 1978.— № 4.
15. **Быковский Ю. А., Миронос А. В., Смирнов В. Л., Солдатов В. И.** Использование селективности растворения пленок ХСП для формирования пассивных элементов интегральной оптики // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 6.
16. **Андриеш А. М., Быковский Ю. А., Бородакий Ю. В. и др.** Формирование волноводных каналов в оптических волноводах на основе ХСП // Письма в ЖТФ.— 1984.— № 6.
17. **Heitmann D., Pole R. V.** Two-dimensional focusing holographic grating coupler // Appl. Phys. Lett.— 1980.— V. 37, N 7.— P. 585.
18. **Бахвалов Н. С.** Интерполяция и смежные вопросы // Численные методы.— М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 3 февраля 1987 г.

УДК 772.99

Н. С. МЕРЗЛЯКОВ, Н. Р. ПОПОВА

(Москва)

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФРЕНЕЛЯ ПРИ ЦИФРОВОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ГОЛОГРАММ

В акустической, сейсмической и радиоголографии в настоящее время широко используется цифровое восстановление голограмм, основанное на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье. Однако в ряде случаев, когда расстояние до объекта сравнимо с размерами объекта и голограммы, при этом объект находится в ближней зоне дифракции, приближение Фурье или Френеля в общем виде не выполняется. Поэтому весьма актуальным становится вопрос о границах применимости дискретного преобразования Фурье и Френеля (ДПФ и ДПФр) при восстановлении голограмм с помощью ЭВМ.

Как правило, при цифровом восстановлении голограмм решается дифракционная задача нахождения поля $g(x, y, z)$ изображения по полю $f(\xi, \eta, 0)$, зарегистрированному на голограмме. Функции $f(\xi, \eta, 0)$ и $g(x, y, z)$ связаны соотношением [1]

$$g(x, y, z) = A\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int f(\xi, \eta, 0) \exp\{ik\rho\}\, d\xi d\eta, \qquad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны, на которой записана и восстановлена голограмма; $\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}$ — радиус-вектор.

В зависимости от используемых членов разложения радиуса-вектора для параксиального приближения получим формулы преобразования Фурье

$$g(x, y, z) = A\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int f(\xi, \eta, 0) \exp\left\{-i\frac{k}{z}(x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta \qquad (2)$$

и Френеля

$$g(x, y, z) = A \int\int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi, \eta, 0) \exp\left\{-i \frac{k}{2z} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta. \quad (3)$$

В оптике принято, что приближение Фурье (2) справедливо при условии, если фазовая ошибка $\pi\psi_1$, вызванная неучтенными членами разложения ρ, меньше $\pi/100$, т. е.

$$\pi\psi_1 = \frac{\pi}{\lambda z} [x^2 + y^2 + \xi^2 + \eta^2] \leqslant \pi/100. \quad (4а)$$

Аналогично приближение Френеля справедливо при фазовой ошибке

$$\pi\psi_2 = \frac{\pi}{\lambda z^3} \left[\frac{(x-\xi)^4}{4} + \frac{(y-\eta)^4}{4}\right] \leqslant \pi/100. \quad (4б)$$

В случае восстановления голограмм, где главной задачей является получение изображения, описываемого интенсивностью поля $g(x, y, z)$, требования, предъявляемые к фазовым ошибкам, можно резко снизить, а именно: во-первых, отбросить компоненты в выражениях (4а), (4б), влияющие только на фазовые коэффициенты поля $g(x, y, z)$, и, во-вторых, что особенно важно, пересмотреть требования, предъявляемые к значению допустимой фазовой ошибки.

Как известно, величина $\pi/100$ выбрана эмпирически. Считается, что такая флуктуация фазы не приводит к видимому нарушению волнового фронта. В задачах, где представляет интерес не собственно волновой фронт, а его интенсивность, можно пользоваться общепринятым в теории связи условием узкополосности сигнала, по которому допустим временной сдвиг порядка π/ω_0 (где ω_0 — несущая частота), не приводящий к существенному изменению сигнала [2]. Временному сдвигу $\tau = \pi/\omega_0$ соответствует фазовая ошибка $\omega_0\tau = \pi$. Будем считать, что выбранное приближение Фурье или Френеля справедливо при допустимой фазовой ошибке π, тогда выражения (4а) и (4б) с учетом сделанных предположений примут вид

$$\pi\psi_1 = \frac{\pi}{\lambda z} (\xi^2 + \eta^2) \leqslant \pi; \quad (5а)$$

$$\pi\psi_2 = \frac{\pi}{4\lambda z^3} \left[\xi^4 \left(1 - 4\frac{x}{\xi} + 6\frac{x^2}{\xi^2} - 4\frac{x^3}{\xi^3}\right) + \eta^4 \left(1 - 4\frac{y}{\eta} + 6\frac{y^2}{\eta^2} - 4\frac{y^3}{\eta^3}\right)\right]. \quad (5б)$$

В дальнейшем перейдем для простоты к одномерному случаю описания поля голограммы $f(\xi, 0)$ и поля изображения $g(x, y)$. Рассмотрим дискретное представление преобразований Фурье и Френеля, которые используются при цифровом восстановлении голограмм [2].

Пусть размеры голограммы $2L_{\text{гол}}$, шаг дискретизации на голограмме Δ, на восстановленном изображении δ и соответственно полное количество отсчетов $N = 2L_{\text{гол}}/\Delta$. Тогда дискретное преобразование Фурье с точностью до фазового множителя есть

$$g(\delta m) = A \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} f(\Delta n) \exp\left\{-i\frac{2\pi}{N} mn\right\} \quad (6а)$$

и дискретное преобразование Френеля

$$g(\delta m) = A \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} f(\Delta n) \exp\left\{-i2\pi\left[-\alpha\frac{n^2}{2} + \frac{mn}{N}\right]\right\}, \quad (6б)$$

где

$$\alpha = \Delta^2/\lambda z \quad (7)$$

— параметр преобразования Френеля.

Таблица 1

N	32	64	128	256	512	1024
α	$3{,}9\cdot10^{-3}$	$9{,}7\cdot10^{-4}$	$2{,}4\cdot10^{-4}$	$6{,}1\cdot10^{-5}$	$1{,}5\cdot10^{-5}$	$3{,}8\cdot10^{-6}$

Обозначив размер восстановленного изображения через $2L_{об}$, подставив в (5а) и (5б) максимальные значения ξ и x, равные $L_{гол}$ и $L_{об}$ соответственно, и считая, что коэффициент увеличения изображения равен 1, получим следующие оценки максимально допустимых фазовых искажений, при которых можно использовать ДПФ (6а) или ДПФр (6б):

$$\max\{\pi\psi_1\} = \frac{\pi}{\lambda z}\frac{\Delta^2 N^2}{4} = \pi\alpha\frac{N^2}{4} \leqslant \pi; \tag{8а}$$

$$\max\{\pi\psi_2\} = \frac{\pi}{4\lambda z^3}L_{гол}^4\left[1 + 4\frac{L_{об}}{L_{гол}} + 6\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right)^2 + 4\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right)^3\right] = \frac{\pi L_{гол}^4}{4\lambda z^3}Q\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right) \leqslant \pi, \tag{8б}$$

где

$$Q\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right) = 1 + 4\frac{L_{об}}{L_{гол}} + 6\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right)^2 + 4\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right)^3. \tag{8в}$$

Из (8а) следует, что при

$$\alpha < 4/N^2 \tag{9}$$

вместо дискретного преобразования Френеля можно использовать дискретное преобразование Фурье. В табл. 1 приведены значения α в зависимости от количества отсчетов на голограмме по формуле (9).

Использование этой таблицы дает возможность определить границы применимости ДПФ для восстановления голограммы, введенной в ЭВМ, в зависимости от двух параметров: количества отсчетов N и параметра α, заданного формулой (7), в которой λ и z определяются условиями эксперимента, а Δ задает связь между реальной физической голограммой и массивом чисел, введенных в машину: $\Delta = 2L_{гол}/N$.

Оценим теперь фазовую ошибку при переходе из зоны Френеля в ближнюю зону, которая особенно важна в случае восстановления акустических голограмм, где размеры объекта, голограммы и расстояния между ними, как правило, сравнимы между собой. При определении максимального значения ψ_2 удобно выделить множитель $Q(L_{об}/L_{гол})$ (см. формулу (8в)). В табл. 2 приведены значения Q для наиболее часто встречающихся соотношений между размерами объекта и голограммы.

Учитывая данные табл. 2, легко получить значения максимальной фазовой ошибки ψ_2, возникающей при использовании дискретного преобразования Френеля для восстановления изображений с голограммы, записанной в ближней зоне. В табл. 3 приведены значения для некоторых наиболее характерных размеров голограммы и объекта, заданных в длинах волн, при условии, что расстояние до объекта равно линейному размеру голограммы $z = 2L_{гол}$.

Таблица 2

$L_{об}/L_{гол}$	0,0625	0,125	0,25	0,5	1	2
Q	1,3	1,6	2,5	4	15	65

Таблица 3

$2L_{гол}$	50λ	50λ	50λ	100λ	100λ	100λ
$L_{об}/L_{гол}$	1	0,5	0,25	1	0,5	0,25
$\pi\psi_2$	12π	3π	$0{,}2\pi$	24π	6π	$0{,}4\pi$

Таблица 4

$L_{гол} = 50\lambda$						
$L_{об}/L_{гол}$	1			0,5		
N	64	128	256	64	128	256
α	$5{,}4\cdot10^{-3}$	$1{,}35\cdot10^{-3}$	$3{,}4\cdot10^{-4}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-4}$
$L_{гол} = 100\lambda$						
$L_{об}/L_{гол}$	0,5			1		
N	128	256	512	128	256	512
α	$3{,}3\cdot10^{-3}$	$8{,}2\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-3}$	$0{,}5\cdot10^{-3}$

Из табл. 3 следует, что чем меньше размер приемной апертуры голограммы, тем меньше получаемая фазовая ошибка. Этим объясняется тот факт, что на ЭВМ можно восстанавливать голограммы, записанные в ближней зоне, используя ДПФр. Пользуясь выражением (8б), получим значения α, при которых $\psi_2 = 1$, т. е. фазовая ошибка не превышает π:

$$\alpha^3 \leqslant \frac{(2L_{гол})^2/\lambda^2}{\left(\frac{N}{2}\right)^6 Q\left(\frac{L_{об}}{L_{гол}}\right)}. \tag{10}$$

В табл. 4 приведены максимально допустимые значения α для размеров голограммы 50λ и 100λ соответственно в зависимости от $L_{об}/L_{гол}$ и N, при которых ДПФр дает фазовую ошибку порядка π.

Сравнивая теперь табл. 1 и 4, можно получить границы задания параметра ДПФр α. Заметим, что при $\alpha < \alpha_{min}$ преобразование Френеля остается справедливым, однако быстрее и удобнее пользоваться преобразованием Фурье. В табл. 5 в качестве примера приведены граничные значения α_{min} и α_{max} в зависимости от количества отсчетов N и соотношения $L_{об}/L_{гол}$ для случая, когда размер голограммы равен 50λ.

Ниже приводятся экспериментальные результаты цифрового восстановления малоапертурных ультразвуковых голограмм для случая, когда регистрируемый объект находится в ближней зоне.

Запись ультразвуковой голограммы [3] проводилась в баке с водой размером $1\times1\times1$ м^3. Объекты в виде буквенных символов, изготовленные из листового алюминия толщиной 1 см, помещались на расстоянии 60 см от границы водной поверхности, а сферический источник ультразвукового излучения располагался вблизи нее. Использовался радиоимпульсный режим облучения с частотой заполнения 150 кГц ($\lambda = 1$ см), размеры объектов 12λ, 22λ с минимальными размерами деталей 2λ, 4λ.

Регистрация отраженного объектом излучения осуществлялась при синтезе квадратной апертуры размером $45\times45\lambda$ за счет механического сканирования 31-элементной приемной линейной антенны. Плоская опорная волна под углом 19,5° по отношению к нормали линейной антенны имитировалась в электронном тракте. Накопление информации осуще-

Таблица 5

N	64		128		256	
α_{min}	$9{,}7\cdot10^{-4}$		$2{,}4\cdot10^{-4}$		$6{,}1\cdot10^{-5}$	
$L_{об}/L_{гол}$	1	0,5	1	0,5	1	0,5
α_{max}	$5{,}4\cdot10^{-3}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$1{,}35\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-3}$	$3{,}4\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$

ствлялось в блоке памяти, основу которого составляла запоминающая ЭЛТ. Зарегистрированная голограмма размером 30×30 мм^2 выводилась на экран телевизионного монитора и фотографировалась для получения оптического транспаранта. Были получены транспаранты размером 0,5—0,6 мм для оптического восстановления и размером 8 мм для ввода в ЭВМ. Подчеркнем, что отсутствие непосредственного ввода информации в машину снижает качество голограмм, восстановленных на ЭВМ, так как появляется два дополнительных фактора, вносящих искажение: фотопроцесс при изготовлении транспаранта и ввод голограммы в ЭВМ.

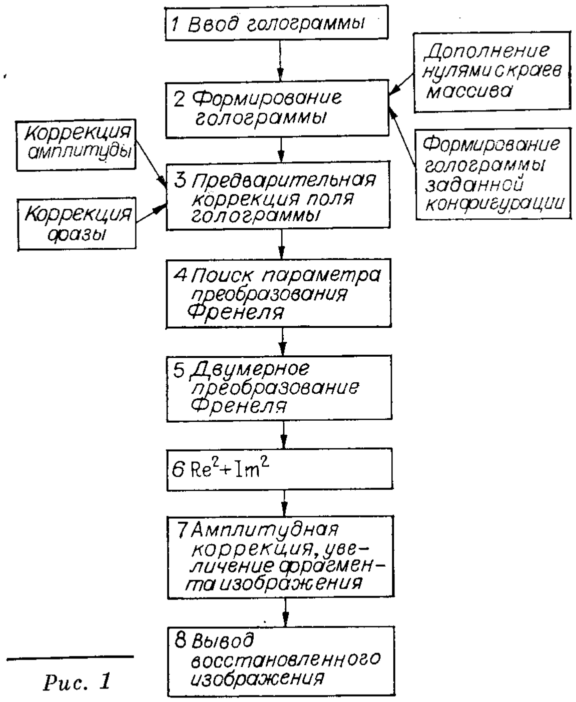

Рис. 1

Параметр α голограммы, введенной в ЭВМ, равен $\sim 4 \cdot 10^{-4}$, что согласно табл. 4 или 5 удовлетворяет условию применимости ДПФр для восстановления голограммы, фазовая ошибка при этом не превышает $0{,}2\pi$ (см. табл. 3). Поэтому далее используется комплекс программ, основанный на ДПФр, состоящий из трех основных этапов: 1) предварительная коррекция и компановка голограммы; 2) дискретное преобразование Френеля, реализующее собственно процесс восстановления; 3) последующая обработка восстановленного изображения, улучшающая его качество [4, 5].

На рис. 1 представлена блок-схема цифрового восстановления голограммы. К первому этапу относятся блоки *1—3*. Ввод слайда (блок *1*) осуществляется с помощью микроденситометра барабанного типа, изображение квантуется на 256 уровней яркости в диапазоне оптической плоскости $0—3D$, апертура и растр ввода равен 25 мкм. Массив введенной голограммы составляет 300×300 элементов. В блоке *2* производятся геометрическое формирование голограммы, дополнение нулями, перестановка или мультипликация отдельных ее частей. В блоке *3* проводится предварительная коррекция голограммы с учетом условий записи и ввода амплитудной и фазовой информации поля.

Второй этап, выполняемый в блоках *4*, *5*, состоит из двумерного ДПФр с предварительным поиском α. При определении параметра преобразования α, как правило, используется априорная информация, если же расстояние от объекта до голограммы не удается точно измерить в процессе записи голограммы, параметр α уточняется с помощью последовательных одномерных преобразований Френеля вдоль строки, соответствующих фокусировке изображения в оптической системе.

Третий этап — обработка восстановленного изображения — проводится в блоках *6*, *7*, вывод откорректированного изображения осуществляется в блоке *8*. Как показано в работе [3], для улучшения качества восстановленного изображения удобно использовать амплитудную коррекцию, сглаживание и усреднение по множеству изображений, восстановленных с однотипных голограмм. В случае малоапертурной голограммы наилучший результат дала амплитудная коррекция. Предварительно строится гистограмма по фрагменту, содержащему интересующую информацию,

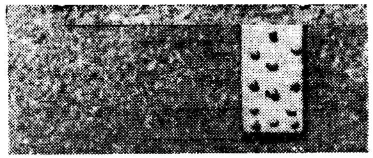

Рис. 2

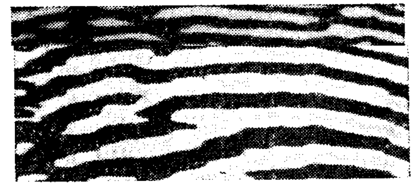

Рис. 3

Рис. 4

Рис. 5

и далее коррекция осуществляется в зависимости от положения границ гистограммы.

Для контроля проводится оптическое восстановление голограммы и результат, полученный оптически, сравнивается с результатом цифрового восстановления. На рис. 2 представлен голографируемый объект — макет буквы «Ч», на рис. 3 — его голограмма. Изображение, восстановленное оптически, показано на рис. 4, и результат цифрового восстановления представлен на рис. 5. Как следует из сравнения рис. 4 и 5, качество восстановленного изображения в обоих случаях примерно одинаково, что еще раз подтверждает возможность использования ДПФр для малоапертурных голограмм, записанных в ближней зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
2. **Ярославский Л. П.** Введение в цифровую обработку изображений.— М.: Сов. радио, 1979.
3. **Зуевич А. В., Алексеенко В. В., Сучак В. М.** Получение изображений подземных объектов методами звуковой голографии // Письма в ЖТФ.— 1980.— Т. 6, вып. 13.
4. **Попова Н. Р., Свет В. Д.** Акустические голограммы и цифровые методы восстановления изображений // Иконика.— М.: Наука, 1985.
5. **Мерзляков Н. С., Попова Н. Р., Ярославский Л. П.** Цифровое восстановление акустических голограмм Френеля // Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. по голографии.— Рига: ИФ АН ЛССР, 1985.

Поступила в редакцию 26 мая 1986 г.