

М. А. КРОНРОД, Н. С. МЕРЗЛЯКОВ, Л. П. ЯРОСЛАВСКИЙ
(Москва)

ОПЫТЫ ПО ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ *

Цифровая голография — это анализ и синтез волновых полей с помощью цифровых вычислительных машин. Под анализом понимается восстановление изображений объектов и измерение их физических и геометрических параметров по измерениям рассеянного ими волнового поля. Обратной задачей является синтез волнового поля, рассеиваемого объектом, по математическому описанию этого объекта.

Использование вычислительных машин для решения указанных задач открывает новые пути в голографии. Например, появляется возможность осуществления операций, не реализуемых обычными средствами голографии (оптическими, фотографическими и т. п.), возможность коррекции оптических и других систем, в том числе возможность использования при анализе и синтезе волновых полей априорной информации о свойствах объектов, возможность получить точные и воспроизводимые количественные результаты. С другой стороны, методы голографии могут способствовать прогрессу вычислительной техники, в частности созданию устройств параллельной обработки данных, трехмерной визуальной индикации, новых запоминающих устройств.

В настоящее время можно указать такие перспективные применения цифровой голографии: 1) синтез пространственных фильтров для устройств параллельной обработки данных; 2) синтез голограмм для трехмерной индикации; 3) создание синтезированных апертур и антенных решеток; 4) обработка радио-, акустических, рентгеновских и других полей; 5) моделирование голографических процессов.

Одними из простейших, но в то же время важных задач цифровой голографии являются синтез голограмм транспарантов и восстановление изображения объекта по его голограмме. Решение этих задач позволит разработать методы синтеза на ЦВМ пространственных фильтров для систем оптической обработки информации и методы измерения характеристик объектов путем анализа рассеянного ими волнового поля.

Ниже описаны опыты с синтетическими голограммами транспарантов и эксперименты по восстановлению изображений объекта по его голограмме.

* Материал доложен на Всесоюзной конференции по автоматизации научных исследований на основе ЭВМ в июне 1972 г. в Новосибирске.

Синтез на ЦВМ голограмм транспарантов. Транспарантом мы будем называть плоское одноцветное изображение. Его взаимодействие с излучением характеризуется коэффициентами пропускания (или отражения) излучения по интенсивности $B(x, y)$ или по амплитуде $b(x, y)$. Коэффициент пропускания $b(x, y)$ по амплитуде является комплексной функцией, которая может быть представлена в виде

$$b(x, y) = |b(x, y)| e^{i\varphi(x, y)}. \quad (1)$$

Если транспарант осветить плоской волной с длиной волны λ , амплитудой A , фронт которой параллелен плоскости транспаранта, то распределение амплитуды поля в плоскости (ξ, η) , параллельной транспаранту и удаленной от него на расстояние z , можно описать с помощью интегрального соотношения

$$\Gamma_0(\xi, \eta) = A \iint_{x, y} b(x, y) T_z(x, y, \xi, \eta) dx dy. \quad (2)$$

Задача синтеза голограммы транспаранта заключается в вычислении функции $\Gamma(\xi, \eta)$ по заданной функции $b(x, y)$ и регистрации ее в такой форме, которая допускала бы ее взаимодействие с излучением, например, для восстановления или визуализации $b(x, y)$.

Важное место в голографии и оптике занимает случай, когда

$$T_z(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{\lambda z} e^{i \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)}, \quad (3)$$

т. е. $\Gamma(\xi, \eta)$ и $b(x, y)$ связаны между собой преобразованием Фурье*:

$$\Gamma_0(\xi, \eta) = \frac{A}{\lambda z} \iint_{x, y} b(x, y) e^{i \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)} dx dy. \quad (4)$$

Будем называть голограммы, синтезированные в соответствии с соотношением (4), Фурье-спектрограммами.

Соотношение (4) можно считать исходным для машинного синтеза Фурье-спектрограмм. В дискретной форме, удобной для реализации на ЭВМ, оно выглядит следующим образом:

$$F_{\hat{b}}(r, s) = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} b(k, l) e^{i2\pi \left(\frac{kr}{N_x} + \frac{ls}{N_y} \right)}, \quad (5)$$

где $F_{\hat{b}}(r, s)$ — матрица отсчетов $\Gamma(\xi, \eta)$; $b(k, l)$ — матрица отсчетов $b(x, y)$; $N_x \times N_y$ — количество отсчетов. Заметим, что это соотношение является двумерным дискретным преобразованием Фурье. Непрерывная спектрограмма может быть получена из матрицы своих отсчетов $F_{\hat{b}}(r, s)$ интерполяцией их значений в промежуточных точках:

$$F_{\hat{b}}(v_x, v_y) = \sum_{r=0}^{M_x-1} \sum_{s=0}^{M_y-1} F_{\hat{b}}(r, s) H(v_x - r\Delta v_x, v_y - s\Delta v_y). \quad (6)$$

Интерполирующая функция $H(v_x, v_y)$ является точечной функцией рассеивания устройства регистрации спектрограммы. Для точной интерполяции значений $F_{\hat{b}}(v_x, v_y)$ она должна иметь вид

$$H(v_x, v_y) = \frac{\sin 2\pi v_x / v_{x \max}}{\pi v_x} \frac{\sin 2\pi v_y / v_{y \max}}{\pi v_y}. \quad (7)$$

* Это соответствует дифракции Фраунгофера. Соотношение (3) описывает также свойства линзы как оптического элемента, выполняющего преобразование Фурье.

Отличие реальной функции рассеивания от идеальной можно учесть, воспользовавшись тем, что интерполяция $F_b(v_x, v_y)$ соответствует умножению функции $\hat{b}(x, p)$ на затеняющую функцию $h(x, y)$, являющуюся пространственным спектром реальной точечной функции рассеивания:

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(v_x, v_y) e^{-i2\pi(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y. \quad (8)$$

Ввод в ЦВМ транспаранта и регистрация синтетической голограммы Фурье. Для ввода изображения транспаранта в ЦВМ необходимо осуществить дискретизацию его на элементы и квантование коэффициента отражения (пропускания) каждого элемента. Полученные квантованные значения затем кодируются двоичным числом и вводятся в вычислительную машину. Для вывода синтезированной голограммы из ЦВМ необходимо преобразовать полученный в ЦВМ массив чисел в распределение какого-нибудь существенного для распределения света физического параметра, например в распределение коэффициента пропускания на фотопластинке. В наших опытах для выполнения этих операций использовалось устройство ввода — вывода изображений для ЦВМ «Минск-22», построенное на базе фототелеграфной аппаратуры.

Схема вывода изображений показана на рис. 1. Для того чтобы увеличить угловые размеры получаемого при восстановлении голограммы в когерентном видимом свете изображения, голограмма, выведенная из машины и имеющая шаг дискретизации $\Delta v_x = \Delta v_y = 0,2$ мм, уменьшалась фотографическим путем в 20 раз. Это позволило обеспечить угловые размеры восстановленного изображения при длине волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм

$$\Theta_x = \Theta_y = \frac{\lambda}{\Delta \xi_x} \frac{20\lambda}{\Delta v_x} \approx \frac{20 \cdot 0,63 \cdot 10^{-4}}{0,2} \approx 7,5 \text{ град.}$$

Уменьшенная спектрограмма регистрировалась на фотопленке Микрат-900, обладающей достаточно высоким разрешением. Уменьшение осуществлялось с помощью высококачественного киносъёмочного объектива РОЗ-3М. Размер уменьшенных спектрограмм составлял $2,5 \times 2,5$ мм при исходной 50×50 мм и 5×5 мм при исходной 100×100 мм. Максимальная пространственная частота составляла 100 линий/мм. Восстановление изображения транспаранта производилось по обычной схеме Фурье с помощью гелий-неонового лазера ЛГ-75. Действительное изо-

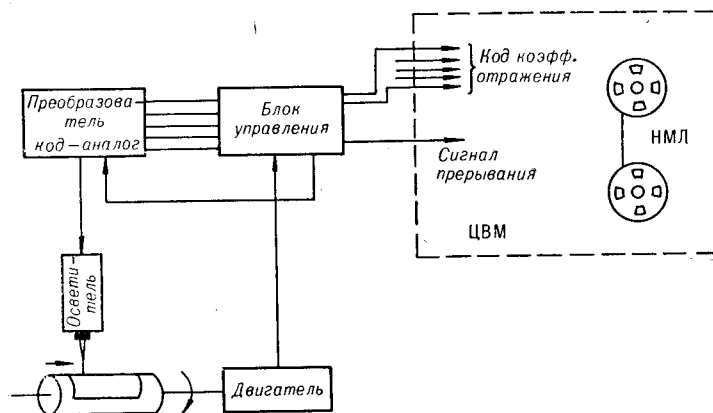


Рис. 1.

бражение регистрировалось на фотографических пластинках NP-20, обладающих достаточной чувствительностью к длинноволновому видимому спектру.

Организация вычислительных процедур. В наших опытах использовалось устройство вывода изображений, с помощью которого можно зарегистрировать результат в виде распределения плотности почернения на фотопленке. Поэтому программа вычисления Фурье-спектрограммы введенного транспаранта строилась так, чтобы в результате вычислений был получен массив вещественных неотрицательных чисел, представляющих в логарифмическом масштабе коэффициенты разложения дискретного исходного изображения в двумерный ряд Фурье.

Поскольку, вообще говоря, преобразование Фурье функции, не обладающей симметрией, является комплексной функцией, для получения чисто вещественного результата использовался следующий прием. Преобразованию Фурье подвергалась матрица чисел, представляющая собой продолженную четным образом исходную матрицу. Если это делать с каждой строкой изображения и столбцом промежуточного преобразования, то это сведется к учетверению изображения и соответственно его спектрограммы. Преимущество такого метода в том, что результат промежуточного преобразования Фурье является в этом случае также вещественным, что облегчает его консервацию в машине. Если каждую строку исходного изображения дополнить зеркальным отражением строки, симметричной ей по отношению к противоположному краю изображения, то в результате двойного преобразования Фурье также получится чисто вещественный массив чисел, количество которых лишь вдвое превышает число элементов исходного изображения. Однако результат одномерного промежуточного преобразования Фурье будет массивом комплексных чисел, что затрудняет его хранение в долговременной памяти ЦВМ.

Симметрирование изображений легко осуществляется программным путем.

Программа получения Фурье-спектрограмм транспарантов состоит из последовательных блоков: ввод транспаранта, коррекция нелинейности ввода, раздвоение или учетверение, преобразование Фурье по строкам, зашифровка, транспонирование, расшифровка, преобразование Фурье по столбцам, коррекция затенения, коррекция нелинейности вывода, вывод.

В блоке «Коррекция нелинейности ввода» производится вычисление распределения амплитудного коэффициента отражения по введенному распределению значений логарифма коэффициента отражения на фотографии по интенсивности. При вычислениях использовалась экспериментально измеренная зависимость между сигналом s , квантуемым для ввода в ЦВМ, и коэффициентом отражения изображения по интенсивности

$$B = 10^{s \lg 32}; \quad s \in [0, 1]. \quad (9)$$

Вычисленные значения коэффициента отражения по интенсивности $B(k, l)$ использовались затем для определения модуля амплитудного коэффициента отражения. Фаза $\beta(k, l)$ коэффициента отражения вводилась искусственно двумя способами. При первом способе задания она полагалась равной нулю. Это соответствует идеально плоскому транспаранту, освещаемому плоским фронтом. При втором способе задания фазы моделировалась диффузная подсветка транспаранта. Для этого значения $\beta(k, l)$ выбирались из последовательности случайных чисел, принимающих с равными вероятностями значения 0 и π .

ного конечными размерами апертуры устройства вывода изображения. Это предсказание осуществляется путем умножения матрицы $\{b(k, l)\}$ на корректирующую матрицу, элементы которой в принципе должны быть обратны отсчетам функции $h(x, y)$. В наших опытах в целях экономии памяти ЦВМ коррекция производилась путем умножения элементов матрицы $\{b(k, l)\}$ на коэффициенты $g(k, l)$, линейно нарастающие с ростом k и l :

$$g(k, l) = \left(1 + g_0 \left|k - \frac{N_x}{2}\right|\right) \left(1 + g_0 \left|l - \frac{N_y}{2}\right|\right). \quad (10)$$

Параметр g_0 определял степень подчеркивания краев.

В блоке «Раздвоение» производится дополнение обрабатываемого массива чисел для симметрирования матрицы.

В блоке «Зашифровка» производится нелинейное предсказание результата преобразования Фурье по формуле

$$F_1 = \frac{F}{1 + |F|}. \quad (11)$$

Необходимость в нелинейном предсказании такого типа вызвана тем, что в целях экономии памяти, а также согласования с устройством регистрации вычисленные коэффициенты Фурье кодируются шестизначными двоичными числами, т. е. квантуются на 64 уровня. Преобразование (11) позволяет сузить динамический диапазон квантуемых величин перед квантованием. Без такого предсказания квантование приводило бы к грубым ошибкам в передаче большей части коэффициентов Фурье*.

В блоке «Расшифровка» производится коррекция предсказания (11) по формуле

$$F = \frac{F_1}{1 - |F_1|}. \quad (12)$$

В блоке «Транспонирование» производится транспонирование промежуточного обработанного изображения для последующего преобразования Фурье по его столбцам.

В блоке «Коррекция нелинейности вывода» отфильтрованная спектрограмма с помощью нелинейного масштабирования перекодируется в матрицу чисел, пропорциональных плотности почернения на фотопленке и поступающих на устройство вывода.

Результаты экспериментов. На рис. 2 показано изображение, восстановленное в когерентном свете по спектрограмме (рис. 3, в), вычисленной для изображения рис. 3, а, без использования блока «Коррекция затенения». Число элементов исходного изображения в этом опыте 128×128 , число элементов спектрограммы 256×256 . Влияние коррекции затенения можно оценить по рис. 4. При получении спектрограммы, по которой восстановлено это изображение, амплитуда света на краях исходного изображения, удаленных от центра симметрии симметриро-

* Следует отметить, что можно поставить задачу об оптимальном квантовании спектрограммы с учетом требований к ее дальнейшему использованию. Нетрудно показать, например, что при требовании постоянства относительной ошибки квантования оптимальной является логарифмическая шкала квантования. По-видимому, возрастание ширины ступеньки квантования с ростом квантуемой величины в той или иной степени требуется почти всегда. В этом смысле преобразование (11) можно считать близким к оптимальному.

ванного изображения, усиливалась по сравнению с амплитудой света в центре в 8 раз. Изображение, восстановленное со спектрограммы, вычисленной с удвоением, показано на рис. 5. Число элементов в исходном изображении здесь составляло 256×512 , спектрограмма состояла из 512×512 элементов. Заметим, что этот опыт опровергает распространенное мнение, что синтетическая голограмма должна обладать по меньшей мере четырехкратной избыточностью по отношению к исходному изображению. Все приведенные выше результаты получены для транспарантов, фаза коэффициента отражения которых полагалась равной нулю.

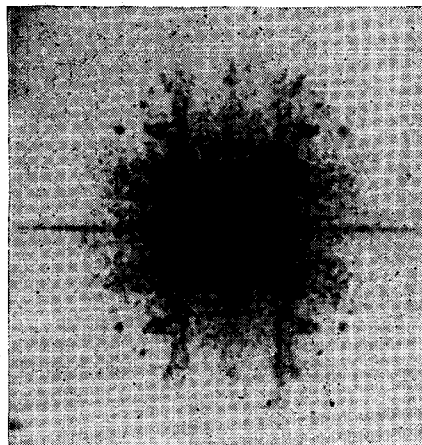


Рис. 2.

Характерной особенностью восстановленных изображений является наличие шума вокруг центрального пятна и контурный характер изображения. Шум вызван фазовыми и амплитудными неоднородностями фотоленки, на которой регистрировалась уменьшенная спектрограмма. Возможны два способа борьбы с этим шумом. Первый способ — смещение восстановленного изображения в сторону от центрального пятна. Это можно сделать, введя пространственную несущую или размещая исходное изображение на удаленной от центра части используемого раstra. В обоих случаях смещение восстановленного изобра-

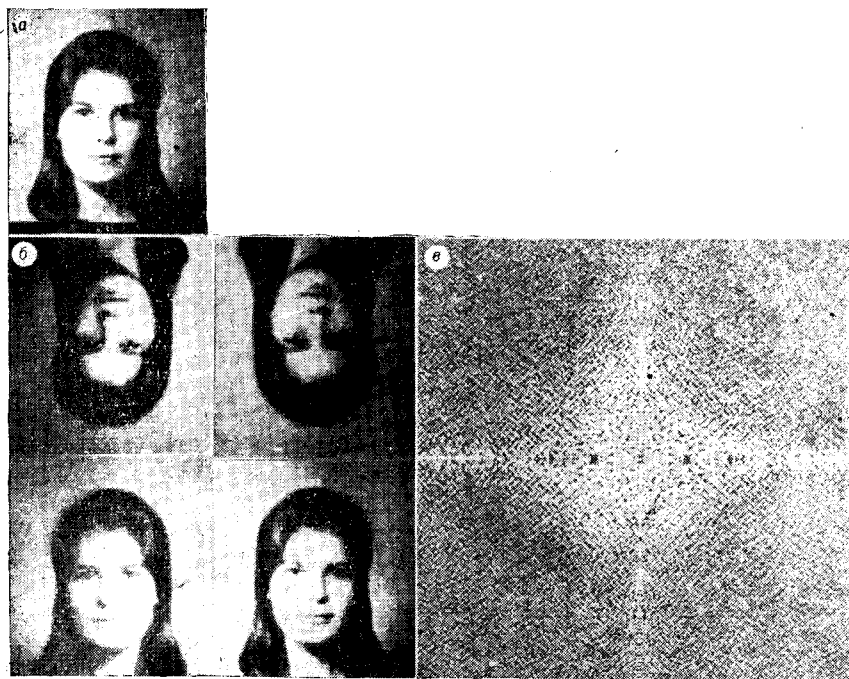


Рис. 3.

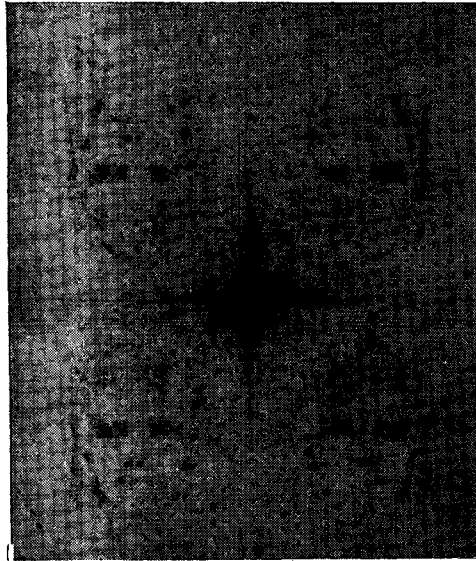


Рис. 4.



Рис. 5.

жения относительно центрального пятна и шума достигается ценой затраты части отсчетов (элементов изображения и спектрограммы) на передачу пространственной несущей. Более эффективным в этом смысле методом борьбы с ним является метод накопления, который заключается в том, что изготавливается несколько копий спектрограммы, которые укладываются рядом друг с другом в виде мозаики, и восстановление производится с такой «размноженной» спектрограммы. Изображение, восстановленное таким способом с девятикратно (мозаика 3×3) размноженной спектрограммы рис. 3, б, показано на рис. 6.

Что касается контурного характера изображения, то он объясняется тем, что при $\beta(k, l) = 0$ не удастся передать на фотоматериале весь динамический диапазон коэффициентов Фурье изображения. В результате соотношение между его низкими и высокими пространственными частотами нарушается в пользу последних, что и приводит к передаче в основном только контурной информации.

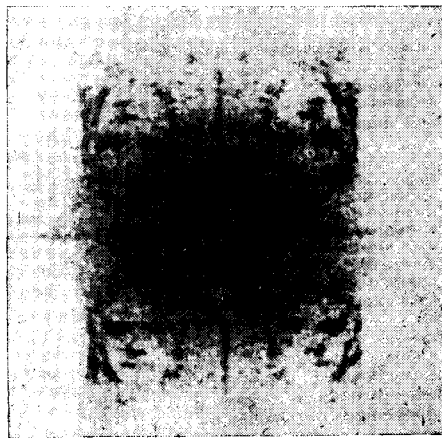


Рис. 6.

Лучшие в этом отношении изображения получены при моделировании диффузной подсветки. Спектрограммы, вычисленные при случайном задании фазы, становятся более однородными. Информация об объекте теперь перераспределяется по всей площади спектрограммы, в результате чего динамический диапазон сужается, и эффекты квантования и ограничения при ее регистрации сказываются меньше. Однако зашумленность восстановленного изображения повышается, так как теперь оно наблюдается как бы на фоне диффузора (рис. 7).



Рис. 7.

Уменьшить степень зашумленности за счет диффузора можно введением избыточности в спектрограмму. Один из возможных способов введения избыточности заключается в синтезе нескольких спектрограмм для различных реализаций матрицы фазы $\beta(k, l)$ и восстановлении изображения сразу по всем спектрограммам, уложенным в виде мозаики. Это эквивалентно расширению пространственного спектра диффузора. В результате диффузор становится как бы более мелкоструктурным и лучше отфильтровывается при рассмотрении изображения. Показанное на рис. 8 изображение получено при восстановлении по девяти спектрограммам (мозаика 3×3).

Восстановление на ЦВМ изображения объекта по его голограмме.

Как известно, голограмма представляет собой зарегистрированный на каком-нибудь чувствительном к излучению материале результат интерференции между волновым фронтом, отраженным от объекта, и опорной волной. Восстановить распределение амплитуды света на объекте можно, если подвергнуть голограмму преобразованию, обратному тому, которое связывает комплексную амплитуду света на объекте и комплексную амплитуду света $|\Gamma_0(\zeta, \eta)|e^{i\chi(\zeta, \eta)}$ в плоскости голограммы.

Мы ограничимся случаем съемки голограмм в дальней зоне, когда это преобразование является преобразованием Фурье, а объект можно

считать плоским. В этом случае объект характеризуется своим коэффициентом отражения $b(x, y)$:

Поскольку при вводе в ЦВМ отсчеты голограммы $\Gamma(r, s)$ являются результатом интегрирования исходной непрерывной голограммы апертурой $H(\zeta, \eta)$ устройства ввода, то необходимо компенсировать затенение восстановленного изображения функций:

$$h(k, l) = \iint_{\zeta\eta} H(\zeta, \eta) e^{i \frac{2\pi}{\lambda z} \left[\zeta h \left(\frac{N_x}{2} \right) \Delta x + \eta \left(l - \frac{N_y}{2} \right) \Delta y \right]} d\zeta d\eta. \quad (14)$$

Дискретизация голограммы с шагом $\Delta\zeta, \Delta\eta$ при вводе в ЦВМ приводит к периодическому пространственному размножению восстановленного изображения. Для того чтобы при этом периферийные части изображения не искажались в результате наложения повторов, необходимо выполнение условия:

$$\Delta\zeta < \frac{\lambda z}{2x_{\max}} = \frac{\lambda}{\theta_x + \alpha}; \quad \Delta\eta < \frac{\lambda z}{2y_{\max}} = \frac{\lambda}{\theta_y}, \quad (15)$$

где θ_x, θ_y — угловые размеры объекта при его наблюдении с места фиксации голограммы, а α — угол наклона опорного пучка.



Рис. 8.

Ввод в ЦВМ голограммы и вывод восстановленного изображения. В наших экспериментах по восстановлению голограммы использовалась голограмма, снятая с целью изучения возможности передачи голограмм по фототелеграфному каналу. Для ввода голограммы и вывода восстановленного изображения использовалось описанное выше устройство ввода — вывода изображений. С целью согласования шага дискретизации голограммы с требуемым шагом дискретизации $\Delta\xi$ исходная голограмма была увеличена в 20 раз. Поскольку используемая аппаратура позволяет вводить в ЦВМ значения коэффициента отражения, увеличенная голограмма была отпечатана на фотобумаге.

В ЦВМ был введен фрагмент увеличенной голограммы размером 516×516 элементов, т. е. 103×103 мм. Это соответствует фрагменту исходной голограммы размером 5×5 мм.

Структура программы восстановления. Программа восстановления изображений на ЦВМ имела следующие основные блоки:

А. Блок коррекции нелинейности ввода. В этом блоке исходный массив чисел $S(r, s)$ подвергался потенцированию с целью вычисления амплитудного коэффициента пропускания голограммы:

$$\Gamma(r, s) = 10^{\frac{S(r,s) \lg 32}{2}}; \quad S \in [0, 1]. \quad (16)$$

Б. Блок преобразования Фурье.

В. Блок формирования изображения объекта по найденной комплексной амплитуде поля $b(k, l)$ объекта вычислял распределение его коэффициента отражения по интенсивности $V(k, l)$.

Г. Блок коррекции затенения.

Для хранения в ЦВМ промежуточных результатов при преобразовании Фурье использовались также описанные выше блоки «Зашифровки» и «Расшифровки».

Результаты экспериментов.

Изображение, восстановленное на ЦВМ с голограммы, о которой говорилось выше, показано на рис. 9. Сравнение его с изображением, восстановленным с голограммы оптическим путем, показывает, что использовавшийся метод восстановления изображения правильно моделирует физические процессы голографирования:

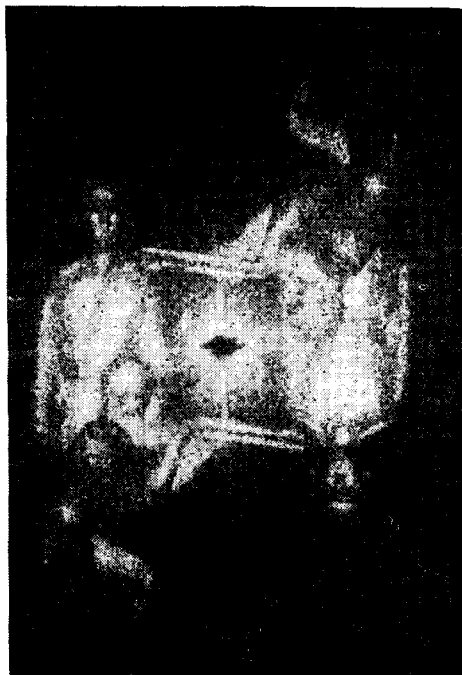


Рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты иллюстрируют не столько возможности, сколько проблемы цифровой голографии, требующие даль-

нейших исследований. Главными из них в настоящее время представляются следующие разработки: 1) специализированной аппаратуры регистрации синтетических голограмм, 2) аппаратуры и методов ввода в ЦВМ голограмм с демодуляцией несущей пространственной частоты, 3) методов дискретизации и квантования голограмм.

Существенную проблему в цифровой голографии составляют затраты машинного времени. В наших опытах для синтеза и анализа голограмм с числом степеней свободы 512×512 требовалось от 3 до 6 часов машинного времени. Такие затраты нельзя считать чрезмерными, если учесть малое быстродействие ЦВМ «Минск-22».

В заключение авторы выражают благодарность Д. С. Лебедеву, по инициативе которого данная работа была предпринята.

*Поступила в редакцию
18 мая 1972 г.*