

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФАЗОМЕТРИИ

В последние годы возрос интерес к проблемам, связанным с созданием оптических и оптоэлектронных систем обработки информации. Основное достоинство таких систем состоит в том, что они позволяют обрабатывать большие массивы информации с максимальной скоростью. Однако такие системы обладают рядом недостатков, присущих всем аналоговым методам: сложностью реализации, значительной погрешностью измерений, жесткостью, негибкостью конструкции. Поэтому на этапе проектирования предпочтительней использование цифровых моделей оптических систем для проверки различных алгоритмов обработки. Это дает высокую точность, простоту изменения параметров и самого алгоритма обработки, доступность результатов и возможность вмешательства на любой стадии обработки.

При реализации цифровых моделей возникает необходимость в хранении и обработке больших массивов информации. Удобным средством моделирования служат системы, созданные на основе управляющей вычислительной машины в совокупности с одним или несколькими спецпроцессорами.

В данной работе описывается цифровое моделирование оптических систем, реализованное на вычислительной системе, на основе ЭВМ СМ-4 и матричного спецпроцессора [1].

При анализе различных оптических систем можно выделить ряд общих элементов: объект наблюдения, пространство от объекта до системы, строящей изображение, элементарные оптические элементы, устройства регистрации. Каждый элемент оптической системы не является идеальным и вносит определенные искажения. При цифровом моделировании систематическую ошибку вносят также дискретизация и квантование.

В качестве оптических элементов в данной работе рассматриваются лишь два элемента — линза и голограммы.

1. Модель объектного поля

Моделирование объектов наблюдения сводится к моделированию комплексной амплитуды объектного оптического поля

$$\varepsilon(x, y) = a(x, y) e^{i\varphi(x, y)} \quad (1)$$

в картинной плоскости S_0 .

Для описания распределения средней яркости трехмер-

ного объекта и представления этого распределения в двумерном виде используется интерактивная графическая система для синтеза трехмерных сцен GRED3 [2]. Фаза поля $\varphi(x, y)$ и флуктуационная часть амплитуды $a(x, y)$ моделируются случайными полями.

Разработан следующий алгоритм генерирования случайного поля с заданным радиусом корреляции:

1. Исходный двумерный массив (кадр) разбивается на ячейки-прямоугольники, средний линейный размер которых совпадает с радиусом корреляции.

2. Ячейки заполняются случайными числами, имеющими заданный закон распределения (обычно нормальный, равномерный или логонормальный).

3. Выполняется двумерная высокочастотная фильтрация. В упрощенном варианте ячейки имеют одинаковые размеры, а после заполнения их случайными числами строки и столбцы кадра сдвигаются по случайному закону.

При моделировании объектов масштаб корреляции выбирается равным линейному разрешению, обеспечиваемому реальной оптической системой.

2. Свободное распространение оптического поля от объекта до плоскости расположения оптического элемента

Свободное пространство осуществляет преобразование Френеля или Фурье в зависимости от соотношения между размерами исходного объектного поля (линейный масштаб оцифрованного объектного поля L_0), расстояние R до плоскости (ξ, η) расположения оптического элемента, длиной волны λ .

Во френелевской области оптическое поле в плоскости (ξ, η) описывается выражением

$$E(\xi, \eta) = \iint_{S_0} \varepsilon(x, y) \cdot h(\xi - x, \eta - y) dx dy, \quad (2)$$

где $h(x, y)$ — импульсный отклик свободного пространства;

$$h(x, y) = \frac{i}{\lambda R} \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} R - i \frac{\pi}{\lambda R} (x^2 + y^2) \right\}. \quad (3)$$

Во фраунгоферовской области (удаленный объект) оптическое поле в плоскости (ξ, η) описывается преобразованием Фурье, которое удобно записать в терминах углового распределения

$$E(\xi, \eta) = i \iint_{\Omega_0} \varepsilon(\theta_x, \theta_y) \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} (\theta_x \cdot \xi + \theta_y \cdot \eta) \right\} d\theta_x d\theta_y. \quad (4)$$

Пусть реальный оптический элемент, внесенный в плоскость (ξ, η) , обеспечивает N или менее N линейных эле-

ментов разрешения в исходном поле $\varepsilon(x, y)$. Пусть \bar{L}_L — линейный размер воображаемого оптического элемента, обеспечивающего ровно N линейных элементов разрешения в поле $\varepsilon(x, y)$. Тогда, с учетом некоторых ограничений [3], дискретное преобразование Френеля может быть представлено в виде (опущены все постоянные значения фазы)

$$\begin{aligned}
 E\left(\left[p - \frac{N-1}{2}\right] \cdot \Delta\xi, \left[q - \frac{N-1}{2}\right] \cdot \Delta\eta\right) &= \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\lambda R} \cdot \exp \times \\
 &\times \left\{ -i\pi \left[W \frac{p^2 + q^2}{N} + \frac{N-1}{N} (1-W)(p+q) \right] \right\} \times \\
 &\times \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon\left(\left[m - \frac{N-1}{2}\right] \Delta x, \left[n - \frac{N-1}{2}\right] \Delta y\right) \times \\
 &\times \exp \left\{ -i\pi \left[\frac{m^2 + n^2}{WN} + \frac{N-1}{WN} (W-1)(m+n) \right] \right\} \times \\
 &\times \exp \left\{ i \frac{2\pi}{N} (p \cdot m + q \cdot n) \right\}, \quad (5) \\
 p &= 0, 1, \dots, N-1; \quad q = 0, 1, \dots, N-1.
 \end{aligned}$$

Здесь

$$W = \bar{L}_L / L_0, \quad N = \frac{L_0 \bar{L}_L}{\lambda R}, \quad (6)$$

$$\Delta x = \Delta y = \lambda R / \bar{L}_L, \quad \Delta \xi = \Delta \eta = \lambda R / L_0. \quad (7)$$

Дискретное преобразование Френеля (5) реализуется, как и преобразование Фурье (4), с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

3. Модель фазовых искажений, вносимых турбулентной атмосферой

Турбулентная атмосфера, присутствующая на оптической трассе, в предположении изопланатичности описывается фазовым транспарантом, расположенным в плоскости (ξ, η) (модель тонкого слоя)

$$T_a(\xi, \eta) = \exp \{ i \varphi_a(\xi, \eta) \}. \quad (8)$$

Распределение фаз $\varphi_a(\xi, \eta)$ моделируется случайным полем, способ генерации которого описан в пункте 1. Масштаб корреляции в данном случае выбирается равным масштабу корреляции, характерному атмосферным искажениям.

4. Оптический элемент — линза

Любую оптическую систему, строящую изображение, можно представить в виде одной эквивалентной линзы. По-

этому модель оптической системы с оптическим элементом — линзой — является достаточно общей при оценке влияния искажений волнового поля на качество изображения, формируемого реальной системой.

Тонкая линза, помещаемая в плоскости (ξ, η) , описывается в виде транспаранта $T_L(\xi, \eta)$ с пропусканием

$$T_L(\xi, \eta) = P_L(\xi, \eta) \cdot \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda F} (\xi^2 + \eta^2) + i\varphi_L(\xi, \eta) \right\}, \quad (9)$$

где $P_L(\xi, \eta)$ — апертурная функция;

F — фокусное расстояние;

$\varphi_L(\xi, \eta)$ — абберации линзы.

Абберации моделируются рядом по нормированным полиномам Цернике [4].

Комплексная амплитуда поля непосредственно за линзой

$$E_L(\xi, \eta) = E(\xi, \eta) T_a(\xi, \eta) T_L(\xi, \eta). \quad (10)$$

Дискретизация поля (10) тривиальна.

5. Оптический элемент — голограмма

Голограмма как оптический элемент может играть важную роль в системах обработки оптической информации. Здесь мы рассмотрим только одно из применений голограмм: возможность с ее помощью восстановить фазовую информацию наряду с амплитудной.

Процесс выделения комплексной амплитуды рассеянного поля по измерениям интенсивности света от голограммы описан в работе [5], экспериментальные исследования по восстановлению этим методом в электронной микроскопии — в [6].

Голограмма представляет собой запись интерференционной картины двух когерентных полей — рассеянного объектом поля $E(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) \cdot \exp(i\varphi(\xi, \eta))$ и опорного поля

$$E_0(\xi, \eta) = A_0 \cdot \exp(i\Phi_0(\xi, \eta)). \quad (11)$$

Если фотопластина обработана оптимальным образом, то ее пропускание пропорционально регистрируемой интенсивности

$$T = T_0 - \beta(I - I_0), \quad (12)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Обычно опорная волна значительно превышает по интенсивности объектную, и средняя регистрируемая интенсивность I_0 может быть выбрана в виде $I_0 = |E|^2$. С учетом этого голограмма представляется в виде транспаранта

$$T_H(\xi, \eta) = P_H(\xi, \eta) \cdot \{ T_0 - \beta [|E(\xi, \eta)|^2 + E_0(\xi, \eta) \cdot E^*(\xi, \eta) +$$

$$+ E_0^*(\xi, \eta) \cdot E(\xi, \eta)\}, \quad (13)$$

где $P_H(\xi, \eta)$ — апертурная функция;

(*) — знак комплексного сопряжения.

Восстановление действительного изображения осуществляется просвечиванием голограммы волной, сопряженной опорной. При этом комплексная амплитуда поля непосредственно за голограммой

$$E_H(\xi, \eta) = E_0^*(\xi, \eta) \cdot T_H(\xi, \eta),$$

$$E_H(\xi, \eta) = P_H(\xi, \eta) \cdot \{ T_0 A_0 \cdot \exp(-i\Phi_0(\xi, \eta)) - \beta A_0 A^2(\xi, \eta) \times$$

$$\times \exp(-i\Phi_0(\xi, \eta)) - \beta A_0^2 A(\xi, \eta) \cdot \exp(-i\varphi(\xi, \eta)) -$$

$$- \beta A_0^2(\xi, \eta) \cdot \exp(+i\varphi(\xi, \eta) - i2\Phi_0(\xi, \eta))\}. \quad (14)$$

При дальнейшем распространении волны образуются четыре дифракционные составляющие, соответствующие четырем слагаемым в соотношении (14). Третье и четвертое слагаемое дают действительное и искаженное мнимое изображения, первое и второе слагаемые являются помехой в восстановленном оптическом сигнале.

Для того чтобы отделить нужную восстановленную волну в плоскости изображения, необходимо иметь или достаточно большой угол между предметным и опорным пучками, или же достаточно большое расстояние до плоскости изображения.

В работе [5] описан алгоритм, позволяющий добиться разделения волн в любой плоскости, в которой не происходит физического разделения, если только выполняется условие разделения их спектров.

6. Распространение оптического поля от плоскости расположения оптического элемента до плоскости регистрации

Процесс распространения оптического поля от плоскости (ξ, η) расположения оптического элемента до плоскости (x', y') регистрации описывается аналогичным (2) образом (R_2 — соответствующее расстояние):

$$E'(x', y') = \iint_{S_a} E(\xi, \eta) \cdot h(x' - \xi, y' - \eta) d\xi d\eta, \quad (15)$$

где $E(\xi, \eta)$ — это либо поле $E_L(\xi, \eta)$, либо $E_H(\xi, \eta)$;

$$h(x, y) = \frac{i}{\lambda R_2} \cdot \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} R_2 - i \frac{\pi}{\lambda R_2} (x^2 + y^2)\right\}. \quad (16)$$

Дискретизация соотношения (15) приводит к формуле, аналогичной (5).

7. Моделирование регистрирующих систем

Цифровые модели различных регистрирующих систем описаны, например, в работе [7]. Поэтому эта часть модели оптических систем здесь не представлена.

8. Контроль результатов обработки оптической информации

В процессе моделирования на любом этапе имеется возможность контроля. Можно получить как качественную, так и количественную информацию: графики, полутоновые картины, гистограммы, различные таблицы значений. Для этого используется программное обеспечение комплекса технических средств вычислительной системы, на котором проводится моделирование.

9. Иллюстрация цифрового моделирования оптических систем

Рис. 1—5 иллюстрируют некоторые возможности цифрового моделирования оптических систем.

Моделируемые (обрабатываемые) поля представляют собой матрицы комплексных чисел размером 256×256 элементов. Время наложения случайного поля на исходную детерминированную модель объекта, пересчета в плоскость расположения линзы, наложения атмосферных фазовых искажений, пересчета в плоскость изображения составляет около 30 секунд. Время получения цифровой голограммы, умно-

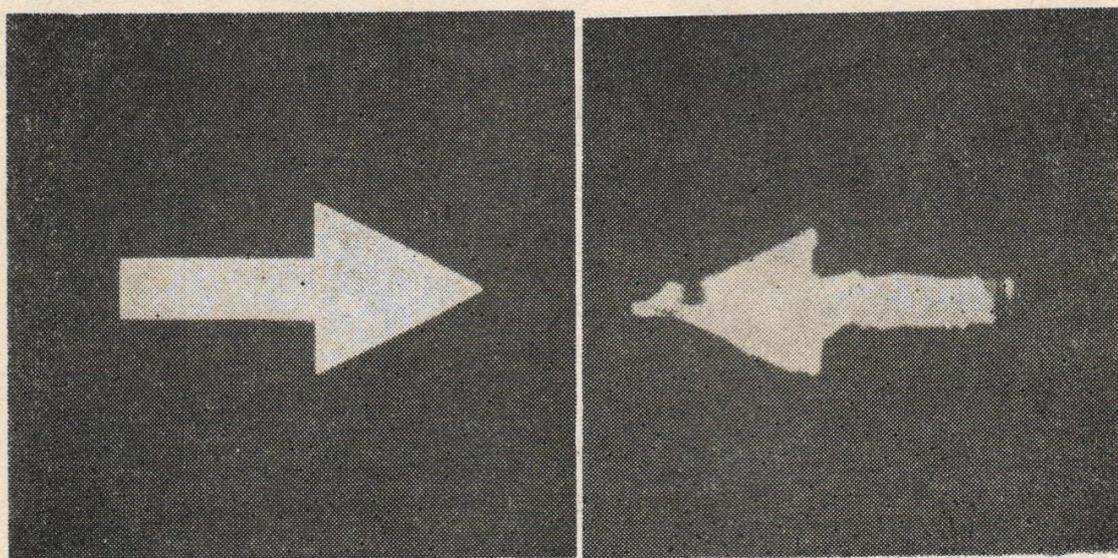


Рис. 1. Объект и перевернутое линзой его изображение: а — модельный объект с детерминированным распределением амплитуд и случайным распределением фаз; б — изображение объекта, образованное линзой, апертура которой обеспечивает 64 линейных элемента разрешения на объектном поле внимания

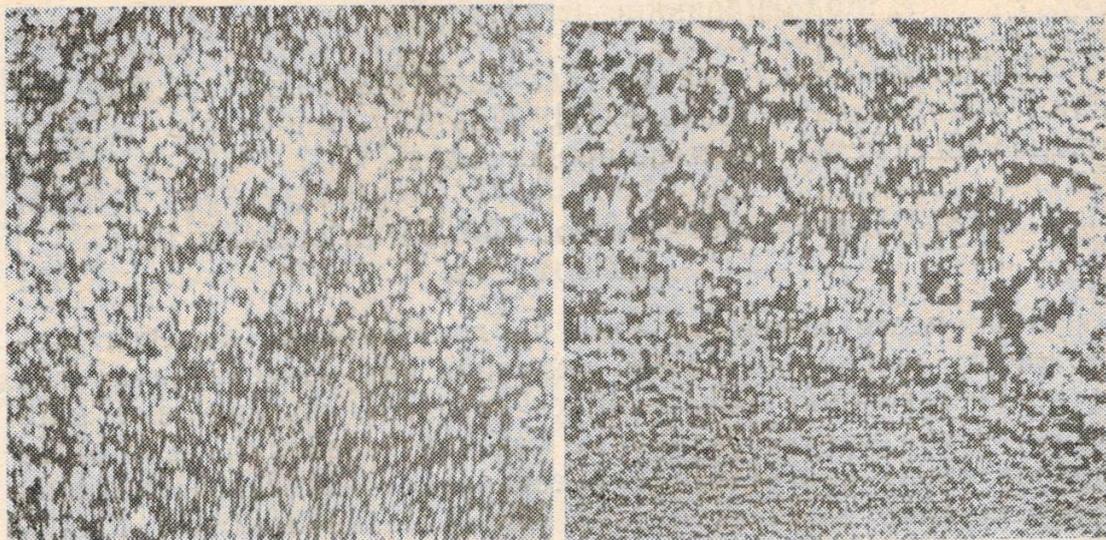


Рис. 2. Распределение амплитуд (а) и фаз (б) в плоскости расположения линзы

жения на сопряженную опорную волну, вычисления восстановления поля составляет около 20 секунд.

Рассмотренная система цифрового моделирования позволила практически в реальном масштабе времени изучить влияние как атмосферных фазовых искажений, так и различных степеней расфокусировки, ограничения апертуры, аберраций на качество изображения; проверить действие отдельных алгоритмов выделения предметной волны. Эта система в настоящее время расширена для моделирования линзовых растров, гартмановских счетчиков, голографических интерферометров.

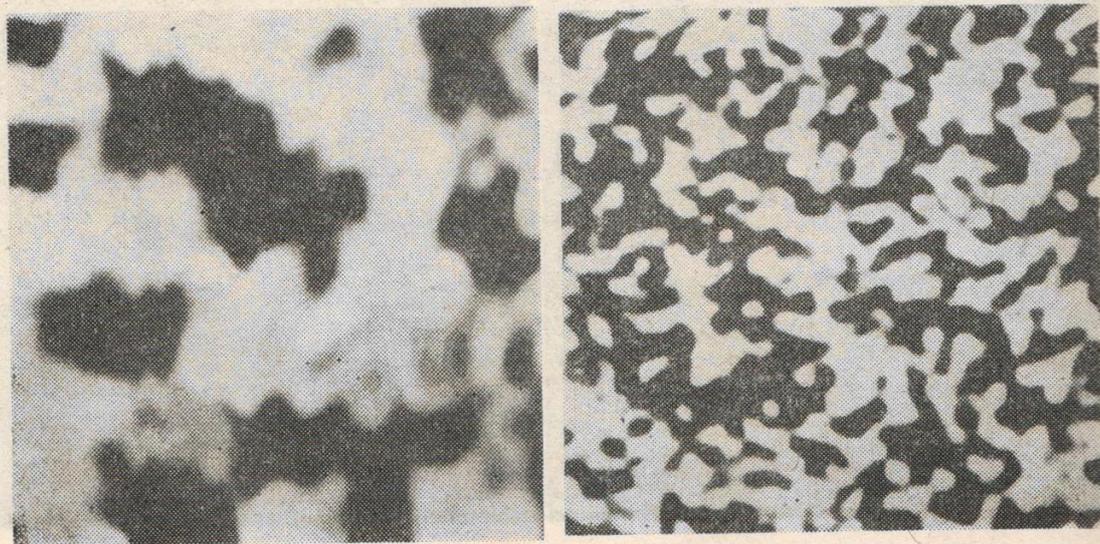


Рис. 3. Модели фазовых искажений, обусловленных турбулентной атмосферой: а — на апертуре линзы укладывается в среднем 8×8 атмосферных зон корреляции; б — 32×32 зон (распределение фаз в обоих случаях равномерное в пределах $0-2\pi$ радиан)

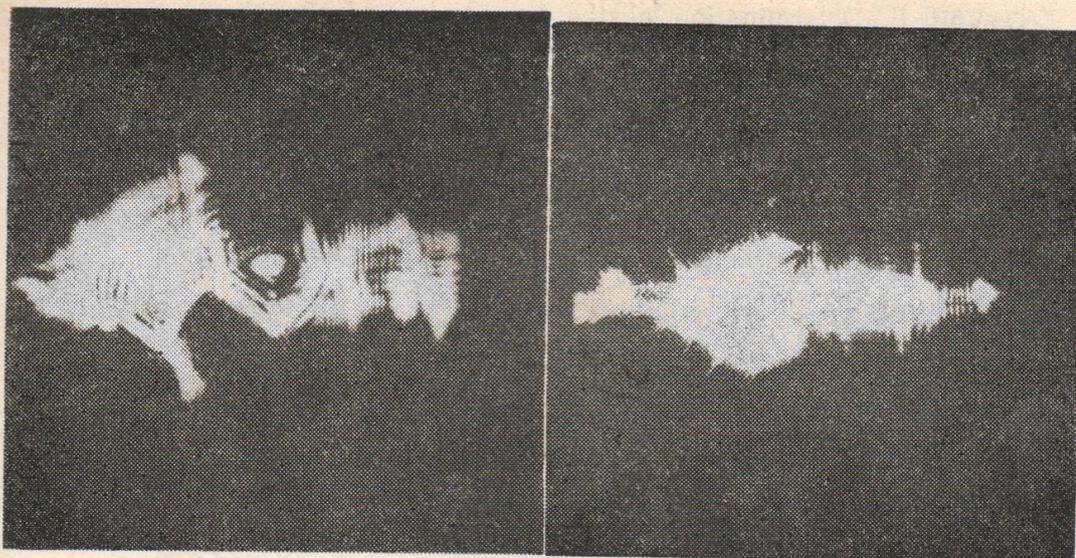


Рис. 4. Влияние атмосферных фазовых искажений, показанных на рис. 3, (а, б), на изображение объекта

В заключение отметим, что общие элементы оптических систем оформлены в виде модулей, набор которых представляет собой комплекс программных средств, позволяющий моделировать произвольные оптические системы. Использование стандартных блоков моделирования существенно сокращает время разработки систем автоматизации обработки оптической информации.

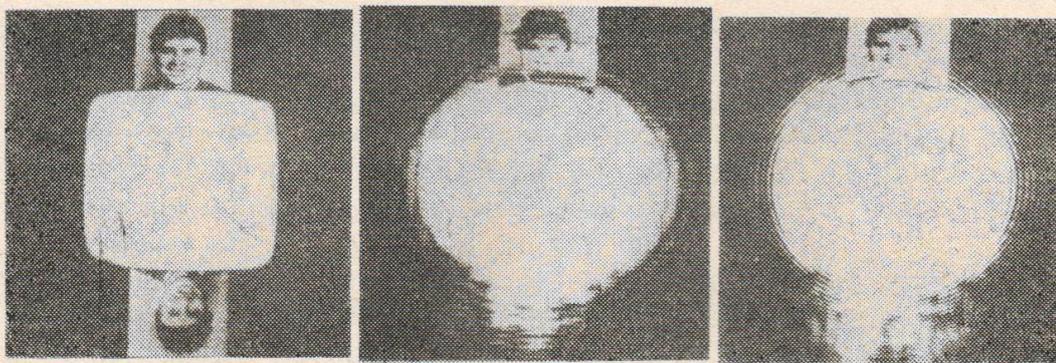


Рис. 5. Амплитуды восстановленных волн при уменьшении расстояния от голограммы до плоскости изображения; от (а) до (в)

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин А. И., Козачок А. Г., Логинов А. В., Цигуткин В. И. Об использовании систем автоматизации обработки оптической информации для решения задач фазометрии.— В настоящем сборнике.
2. Гужов В. И., Родионов В. А. Система создания и редактирования трехмерных сцен.— В настоящем сборнике.
3. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Методы цифровой голографии.— М.: Наука, 1977.— 192 с.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1970.

5. **Volf E.** Determination of the amplitude and the phase of scattered fields by holography.—JOSA, 1970, v. 60, N 1, p. 18.

6. **Mishell D. L., Greenaway A. H.** An application of the Hilbert transform in electron microscopy: II. Non — iterrative solution in Bright — field microscopy and the dark — field problem.— I. Phys. D: Appl. Phys, 1974, v. 7, N 11, p. 1660.

7. **Прэрт У.** Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982, т. 2.— 480 с.