

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА И СЖАТИЕ ДАННЫХ

УДК 535.317.1.

А.И.Водзинский, В.А.Соффер

### ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Голографический метод регистрации волновых полей позволяет записать и хранить полную информацию об объекте [1]. Это дает возможность производить апостериорную обработку данных эксперимента. Методы физической голографии представляют значительные удобства при апостериорном изучении быстропротекающих процессов и динамических объектов [2]. Одной из наиболее интересных и сложных задач является голографическая регистрация и исследование пространственных ансамблей частиц, в частности, аэрозольных частиц (см. рис.1) [3].

Запись голограммы аэрозольных частиц. Пучок импульсного лазера  $\mathcal{L}$  с длиной волны  $\lambda = 6943 \text{ \AA}$  просвечивает поток  $O$  с частицами, изображение которых  $O'$  с помощью объектива  $O_0$  переносится в масштабе 1:1 на расстояние 40 мм от голограммы  $\mathcal{L}$ . Экран  $\mathcal{E}$ , устанавливаемый в заднем фокусе  $O_0$ , вырезает нерассеянный пучок. Опорный пучок наклонен под углом  $\vartheta$ .

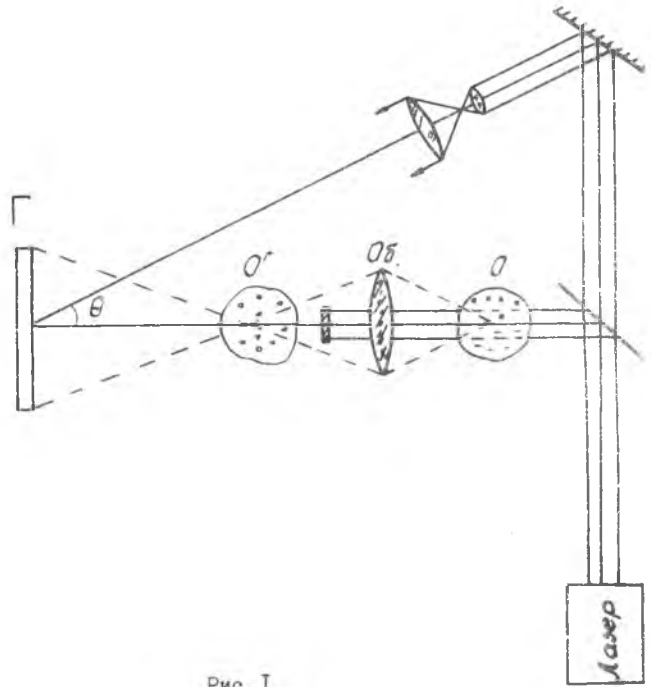


Рис. 1.

Апостериорное изучение описанных динамических объектов производится в настоящее время путем исследования их действительных изображений, восстановленных с голограмм, путем визуального наблюдения в микроскоп, обладающий малой глубиной резкости [2]. Пример наблюдаемого сечения приведен на рис. 2. Такой метод исследования обладает следующими недостатками:

1. Отсутствие какой-либо автоматизации обработки данных голографического эксперимента.

2. Наличие таких погрешностей, как турбулентность потока, шум фотоземлюшки, нелинейность записи и др. Одним из наиболее существ-

венных факторов является шум, создаваемый частицами объемного ансамбля, валяющимися вне плоскости фокусировки микроскопа.

Известные методы физической компенсации описанных погрешностей [2] довольно сложны и ведут к значительной потере информации. Такие потери связаны с принципиальным противоречием между голографическим методом регистрации объекта и не голографическим методом его изучения с помощью наблюдения лишь отдельных сечений объекта.

Перечисленные недостатки могут быть устранены при использовании оптико-цифровой обработки информации [4]. Широкие возможности автоматизации обработки данных описанного голографического эксперимента представляет использование вычислительной техники и методов цифровой голографии [5].

Используемая в настоящее время [2] схема Лейта и Упатниенса

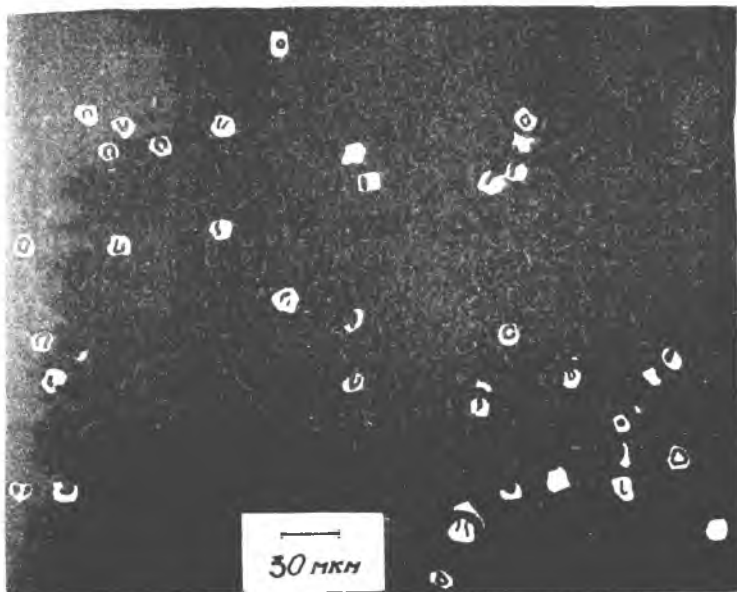


Рис.2.

(см. рис. I) позволяет получить физические голограммы при использовании опорного пучка, составляющего значительный угол с объектным пучком. Это приводит к большой плотности записи информации на голограммы ( $\sim 10^3 \frac{\text{плщ}}{\text{мм}}$ ). В стандартной голограмме размером  $\sim 10$  см x 10 см содержится таким образом  $\sim 10^{10}$  бит информации. Такие объёмы информации не могут быть в настоящее время введены в ЭВМ, поскольку имеющиеся устройства ввода позволяют работать лишь с  $\sim 10^6$  отсчетами. Более того, быстрейшие лучших вычислительных систем ( $\sim 10^7 \frac{\text{опер}}{\text{сек}}$ ) не позволят выполнить даже простейшие операции над столь большими массивами. Так, для простейшего умножения всех элементов массива размера  $\sim 10^{10}$  потребуется  $10^{10} / 10^7 = 1000$  сек  $\approx 17$  мин машинного времени. Осуществление же таких сложных алгоритмов, как преобразование Фурье даже с использованием быстрых алгоритмов (БПФ) потребует неизмеримо большего времени работы лучших вычислительных систем.

Возникает задача сжатия информации. Для ее решения в данном случае следует иметь в виду, что наличие больших объёмов информации на голограмме связано не с наличием информации об объекте, а передачей несущей пространственной частоты, соответствующей введению опорного пучка при регистрации физической голограммы. Так изучаемые аэрозоли [2] содержат не более  $10^6$  частиц, что значительно меньше информационной емкости голограммы. Для ликвидации избыточности до ввода в ЭВМ предлагается провести оптическими методами перекопировку информации на голограмме для ликвидации пространственной несущей.

Пусть объект  $O$  (см. рис. I) создает волновое поле  $U(\vec{x})$  в плоскости  $\vec{x} = (x, y)$  голограммы  $\Gamma$ . Плоский опорный пучок создает поле  $A e^{i\vec{\omega}_0 \vec{x}}$ , где  $\vec{\omega}_0$  характеризует наклон пучка. Голограмма регистрирует интенсивность [6]

$$I(\vec{x}) = |U(\vec{x}) + A e^{i\vec{\omega}_0 \vec{x}}|^2 = (|U|^2 + A^2) + U A e^{-i\vec{\omega}_0 \vec{x}} + U^* A e^{i\vec{\omega}_0 \vec{x}} \quad (I)$$

интерференционной картины объектного и опорного пучков. Второе слагаемое в (I) несет информацию об объекте в виде модуляции несущей пространственной частоты  $e^{i\vec{\omega}_0 \vec{x}}$ . Для ввода в ЭВМ требуется комплексная функция  $U(\vec{x})$ . Апостериорное выделение  $U(\vec{x})$  из интерференционной картины (I) может быть произведено в обычной схе-

ме оптической фильтрации [7] ( см. рис. 3).

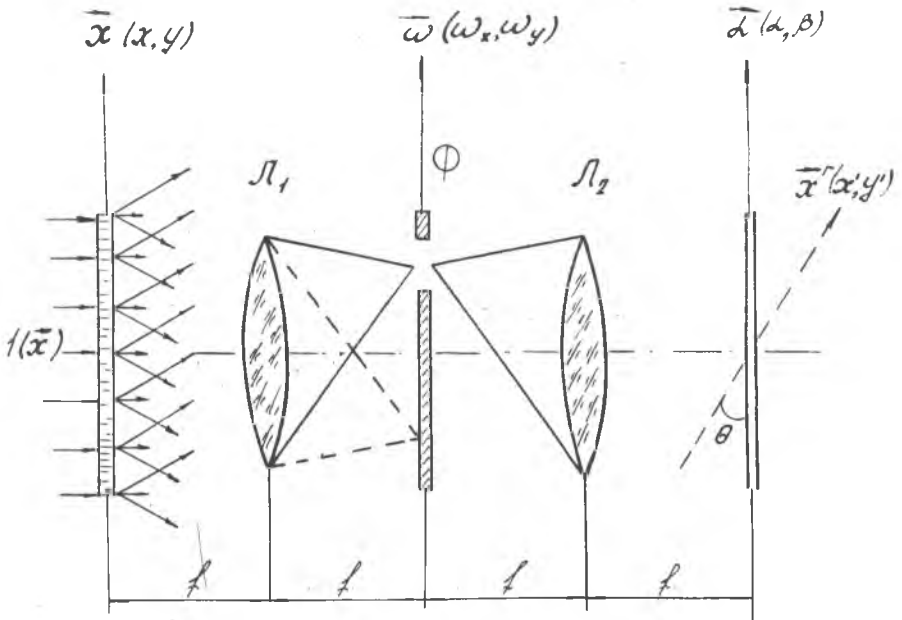


Рис.3.

В плоскости  $\bar{x}$  установлена голограмма. В плоскости Фурье  $\bar{\omega}$  установлен фильтр  $\Phi$ , представляющий непрозрачную маску с отверстием, вырезающим первый дифракционный порядок.  $f$  - фокусное расстояние линз  $L_1$  и  $L_2$ , осуществляющих преобразование Фурье. В плоскости  $\bar{x}'$ , составляющей угол  $\theta$  (равный наклону опорного пучка на рис.1) с плоскостью  $\bar{x}$ , формируется поле  $u(\bar{x}')$ .

Поле  $u(\bar{x}') = |u(\bar{x})| e^{i\psi(\bar{x})}$  является, вообще говоря, комплексным. Однако существующие устройства ввода изображений позволяют работать лишь с вещественными неотрицательными функциями, в частности, зарегистрировать  $|u(\bar{x})|$ . Таким образом, наиболее существенной проблемой является регистрация фазовой ком-

поненты  $e^{i\psi(\bar{x})}$  волнового фронта. Непосредственная запись на фотопленку такого поля невозможна, т.к.  $|e^{i\psi(\bar{x})}| \equiv 1$ .

Предлагается использовать для этой цели известные методы визуализации фазового контраста [6], и, в частности, метод преобразования Гильберта [8]. Гильберт-образ функции  $t(x)$  (для простоты рассматриваем одномерный случай) определяется формулой

$$\chi(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t(x')}{x' - x} dx' = \frac{1}{\pi} (t(x) * P \frac{1}{x}), \quad (2)$$

где интегрирование ведется в смысле главного значения, а  $P \frac{1}{x}$  - известная обобщенная функция, \* - символ свертки. Поскольку Фурье образ  $G(\omega)$  функции  $P \frac{1}{x}$  имеет вид

$$G(\omega) = i \operatorname{sgn} \omega = i \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases}.$$

то преобразование Гильберта легко осуществляется в когерентно-оптической системе типа изображенной на рис.5, где маска  $\Phi$  заменена на пространственный фильтр, состоящий из фазовых пластинок в полволны, расположенных во II и IV квадрантах плоскости  $\bar{\omega}$ . Известны и другие оптические методы [9] реализации преобразования Гильберта.

Известно [8], что гильберт-образ функции  $t(x) = e^{i\psi(x)}$  содержит информацию о фазе  $\psi(x)$ . Например, при  $\psi(x) = a \cos(\omega_0 x)$  гильберт образ  $\chi(x) \approx -ia \sin \omega_0 x$ . Таким образом, регистрируя интенсивность гильберт-образа фазовой компоненты  $e^{i\psi(x)}$  функции  $u(x) = |u(x)| e^{i\psi(x)}$  мы получим непосредственную информацию о  $\psi(x)$ . Соответствующий транспарант, вместе с полученным ранее транспарантом, отображающим  $|u(x)|$  представляет собой перекодированную формы представления голографической информации, освобожденную от избыточности и пригодную для ввода в ЭВМ.

Вводя в ЭВМ полученную амплитудную фазовую информацию об объекте, мы получаем возможность восстановить объект или его сечения цифровыми методами [5], используя алгоритм БПФ. При этом появляется возможность коррекции погрешностей голографической схемы, уменьшить случайные шумы, вызванные турбулентностью голографируемого потока, а также провести автоматический анализ изображения [10] и получить скорректированное изображение.

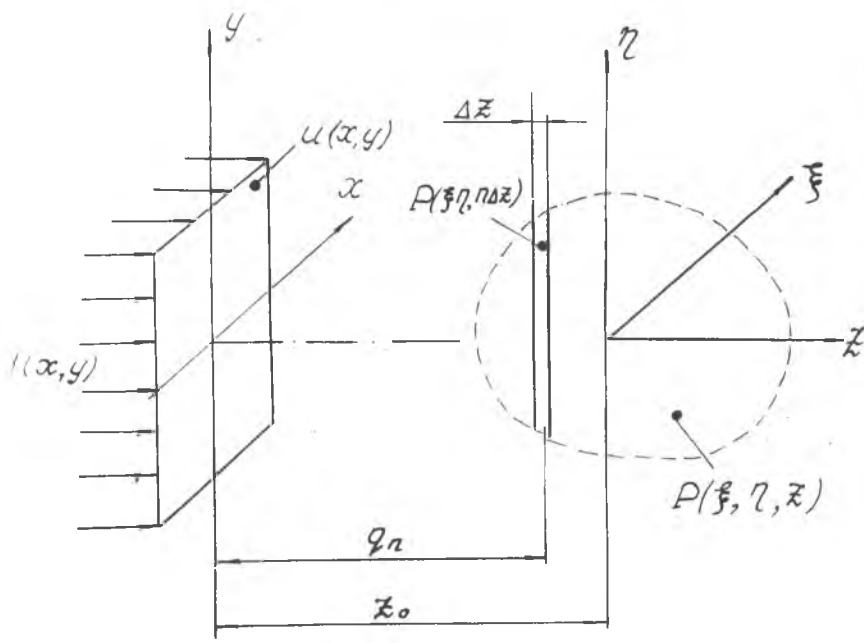


Рис. 4.

Для реализации цифрового восстановления объекта по сечениям составим модель распространения когерентного излучения при восстановлении. Пусть объект описывается функцией  $P(\xi, \eta, z)$ . Поскольку в ЭВМ отображается комплексный волновой фронт  $u(x, y)$ , то физическим аналогом цифровой схемы восстановления будет рассмотрение дифракции на амплитудно-фазовом транспаранте  $u(x, y)$  (см. рис. 4).

В результате дифракции получаем действительное изображение, описываемое функцией  $P(\xi, \eta, z)$ , аппроксимируемое набором поперечных сечений  $P(\xi, \eta, n\Delta z)$ ,  $n = 1, 2, \dots$  [5]. Найдем комплексную амплитуду светового поля в  $n$ -м сечении, соответствующую излучению лишь тех точек, которые находятся в этом сечении. Таким образом, мы автоматически ликвидируем помехи от других

овечий, имеющие место при оптическом восстановлении. Известно [6], что распространение света в пространстве описывается преобразованием Френеля. Таким образом

$$U(\xi, \eta, \rho \Delta z) = \frac{1}{i \lambda q_n} \iint u(\alpha, \beta) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda q_n} [(\xi - \alpha)^2 + (\eta - \beta)^2]\right\} d\alpha d\beta \quad (3)$$

где  $\lambda$  - длина волны,  $q_n = z_0 + n \Delta z$ . Вводя величину  $\omega_n^2 = \pi / \lambda q_n$  и двумерную функцию Френеля

$$g_n(x, y) = 2\omega_n^2 \exp[i\omega_n^2(x^2 + y^2)]$$

получим

$$\begin{aligned} P(\xi, \eta, \rho \Delta z) &= \frac{2\omega_n^2}{2\pi i} \iint u(\alpha, \beta) \exp\{i\omega_n^2 [(\xi - \alpha)^2 + (\eta - \beta)^2]\} d\alpha d\beta = \\ &= \frac{1}{2\omega_n^2 \cdot 2\pi i} g_n(\xi, \eta) \iint [u(\alpha, \beta) \cdot g_n(\alpha, \beta)] \exp\{i\omega_n^2 (\alpha^2 + \beta^2)\} d\alpha d\beta. \quad (4) \end{aligned}$$

Таким образом,  $P(\xi, \eta, \rho \Delta z)$  - есть с точностью до фазового множителя, преобразование Фурье функции  $u \cdot g_n$ , и следовательно, для восстановления объекта цифровыми методами может быть применен алгоритм БПФ, что делает реальной цифровую реализацию интегральных преобразований, описывающих процесс распространения света.

Последним этапом является анализ восстановленного изображения [10] с выделением нужных признаков и вывод скорректированного изображения сечения (освобожденного, в частности, от помех соседних сечений) в виде фотографии, которая может дополнительно исследоваться.

Таким образом, сочетание методов физической и цифровой голографии позволяет автоматизировать обработку данных голографического эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дениски Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. - ДАН СССР, 1962, т. 144, с. 1275.



2. Стаселько Д.И. Особенности голографической регистрации быстропротекающих процессов при использовании импульсного лазера на рубине. - В кн. : Оптическая голография, Л. "Наука", 1975, с. 4-70. -
3. Thompson B.J., Ward J.H., Kirkby W.R. Applications of Hologram Techniques for Particle Size Analysis - *appl. opt.*, **16**, March 1967, p.p. 519-526
4. Sazochuk A.A. Optical and Digital Information Processing. - *Optical Engineering*, **13**, №3, May/June 1974, p.p. 172-174.
5. Huang T.S. Digital Holography. - *Proc IEEE*, 1971, **V. 59**, №3, p.p. 1335-1346
6. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М., "Наука", 1971.
7. Vander Lugt A. Signal Detection by Complex Spatial Filtering. - *IEEE Trans. Inform Theory*, **V. IT-10**, p.p. 139-149 (1964)
8. Сороко Л.М. Преобразование Гильберта и его применение в оптике. - В кн. : Материалы пятой всесоюзной школы по голографии. Л., 1973, с. 40.
9. Belouaux Y., Llorcenthal S. White Light Hilbert Transform. - *appl. opt.*, **V. 10**, №3, March 1971
10. Автоматический анализ сложных изображений. Под ред. С.М. Бравермана. М., "Мир", 1969.

УДК 621.391

В.А. Соффер, Я.Е. Тахтаров, А.Г. Крамов

#### ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОЛЕЙ

Методы цифровой фильтрации случайных полей качественно отличаются от соответствующих методов фильтрации одномерных процессов. Возникающие при обработке полей сложности обусловлены необходимостью ранения и обработки больших массивов информации на ЦВМ. Существует два подхода к фильтрации полей: спектральный и рекуррентный [1]. При реализации спектральных алгоритмов появляются трудности, связанные с ограниченным объемом оперативной памяти и недостаточным быстродействием ЦВМ. Основным недостатком спектральных методов яв-