

## В. Т. ДАВЫДОВ. Е. С. НЕЖЕВЕНКО

Техника оптических аналоговых вычислений может эффективно применяться при анализе изображений. В частности, в процессе обработки фотоснимков нередко возникает необходимость в статистическом анализе структур с целью установления границ между ними. Такого рода обработка изображений требуется при решении задач метеорологии (структурный анализ облачных образований), геологии (анализ структуры земной коры) и т. д. Известно, что одной из информативных характеристик функции пропускания изображения, рассматриваемой как реализация случайного процесса, является спектр мощности, который оценивается частотным спектром изображения. В некоторых публикациях указывается, что метод анализа в частотной плоскости позволяет производить распознавание не только стохастических, но и детерминированных изображений [1]. Суть работы [1] заключается в анализе дифракционных картин Фраунгофера (ДКФ) посредством геометрии дискретизации. Этот процесс, по существу, сводится к измерению количества световой энергии в пределах заданных участков дифракционной картины и получению дифракционного знака, соответствующего данному изображению. Дискретизация — хорошее средство уменьшения объема информации, подлежащей передаче в решающий процессор. Основная задача заключается в том, чтобы выбрать подходящий метод дискретизации, при котором будет сохраняться информация, достаточная для последующей классификации.

Исходя из основных свойств ДКФ, была выбрана геометрия в виде полукольца и клиньев, первые из которых дают пространственно-частотный профиль с учетом всех направлений на ДКФ и нечувствительны к повороту распознаваемого изображения, а вторые, интегрируя по радиус-вектору, дают профиль по направлениям, отражающий структуру конфигураций на изображении с учетом одновременно всех частот.

В работе [1] дискретизация осуществлялась окнами различного вида, выполненными на фотопластинке, путем последовательного перебора на каждом из заданных участков ДКФ. Управление этим процессом производилось либо вручную, либо от вычислительной машины, и время, затрачиваемое на получение дифракционного знака, сравнительно велико, в результате чего невозможно осуществить сплошное сканирование фотоснимка.

В настоящей работе с целью увеличения быстродействия системы предлагается иной способ получения дифракционного знака, использующий голографический фильтр. Система формирования признаков с использованием голографического фильтра была описана в работе [2], где фильтр устанавливался в плоскости изображения. Модификация этой системы, обеспечивающая выделение признаков в частотной плоскости, представлена на рис. 1.

Схема содержит две плоскости изображения  $P_1$  и  $P_3$  с координатами  $x, y(r, \varphi)$  и частотную плоскость  $P_2$  с координатами  $\omega_x, \omega_y(\omega, \theta)$ . С помощью коллиматора (микрообъектив  $M$ , диафрагма  $D$ , объектив  $O_1$ ) формируется плоская волна, модулируемая функцией пропускания транспаранта с изображением. Затем световое распределение проходит через объектив  $O_2$ , дающий в фокальной плоскости частотный спектр ис-

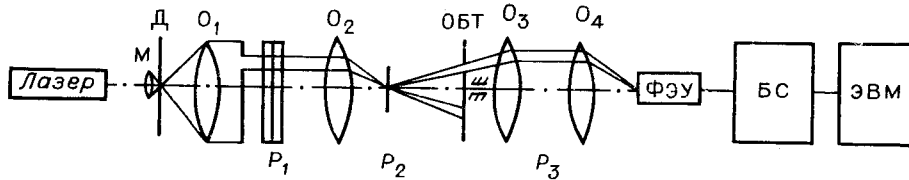


Рис. 1.

ходного изображения. В частотной плоскости  $P_2$  установлен голографический фильтр, на выходе которого получаем разнесенное в пространстве световое распределение спектра изображения или дифракционный знак. Работа устройства считывания и ввода в ЭВМ была рассмотрена в [2], где световое распределение последовательно поступает на ФЭУ и далее через блок сопряжения (БС) в ЭВМ. Минимальное время ввода дифракционного знака из 40 признаков — 400 мкс.

Покажем, что, помещая такой фильтр в частотную плоскость, получим на выходе систему признаков, каждый из которых пропорционален световой энергии соответствующего участка частотного спектра изображения.

Пусть в предметной плоскости помещено изображение  $f(x, y)$ , дающее в частотной плоскости спектр  $F(\omega_x, \omega_y)$ . В дальнейшем эти функции удобнее задать в полярных координатах:  $f(r, \varphi)$  и соответственно  $F(\omega, \theta)$ , где  $x = r \cos \varphi$ ,  $y = r \sin \varphi$ ,  $\omega_x = \omega \cos \theta$ ,  $\omega_y = \omega \sin \theta$ .

Голографический фильтр представляет собой набор полуколец и клиньев из синусональных решеток. Получается такой фильтр путем регистрации элементарных голограмм от двух точечных источников, один из которых поворачивается относительно другого на дискретный угол  $k\pi/2n$ , где  $k=1, 2, \dots, n, n+1 \dots 2n$  — количество элементов фильтра. Конфигурация выбранного фильтра изображена на рис. 2.

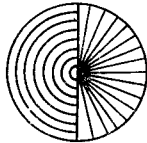


Рис. 2.

Получим выражение, описывающее работу такого фильтра. В плоскости голограммы происходит интерференция световых волн от точечных источников. Результирующая световая интенсивность имеет вид

$$I(\omega, \theta) = \left| \mathcal{F} \left[ \frac{1}{r} \delta(r, \varphi) + \frac{1}{r} \delta\left(r - a, \varphi - \frac{k\pi}{2n}\right) \right] \right|^2 = 2 + e^{-i\omega a \cos(\theta_k - \theta)} + e^{i\omega a \cos(\theta_k - \theta)}, \quad (1)$$

где  $\theta_k = k\pi/2n$ .

Выражение (1) описывает интерференцию двух волн, в результате которой получается синусональная решетка с частотой  $a$  под углом  $\theta_k$  к оси  $x$ . Голограмма фиксирует эту интенсивность, и функцией ее пропускания при линейной регистрации является

$$G(\omega, \theta) \sim I(\omega, \theta). \quad (2)$$

В соответствии с выбранной конфигурацией фильтра представим функции окон для клиньев  $p^{(1)}(\theta_k)$  и полуколец  $p^{(2)}(\omega_k)$  в виде

$$p^{(1)}(\theta_k) = \begin{cases} 1, & \theta_{k-1} < \theta < \theta_k, \quad 0 \leq \omega < \infty, \\ 0 & \text{вне;} \end{cases} \quad (3)$$

$$p^{(2)}(\omega_k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < \pi, \quad \omega_{k-1} < \omega < \omega_k, \\ 0 & \text{вне;} \end{cases}$$

где  $\theta_k = \theta_{k-1} + \pi/n$ ,  $\theta_0 = 0$ ,  $\omega_k = \omega_{k-1} + \Delta\omega$ ,  $\omega_0 = 0$ .

Учитывая (3), выражение для функции пропускания фильтра запишется следующим образом:

$$k(\omega, \theta) = \sum_{k=1}^n G(\omega, \theta) p^{(1)}(\theta_k) + \sum_{k=n+1}^{2n} G(\omega, \theta) p^{(2)}(\omega_k). \quad (4)$$

Умножая (4) на значение  $F(\omega, \theta)$ , получим распределение амплитуд после фильтра

$$h(\omega, \theta) = h^{(1)}(\omega, \theta) + h^{(2)}(\omega, \theta) = \sum_{k=1}^n F(\omega, \theta) G(\omega, \theta) p^{(1)}(\omega, \theta) + \\ + \sum_{k=n+1}^{2n} F(\omega, \theta) G(\omega, \theta) p^{(2)}(\omega_k). \quad (5)$$

Световое распределение, дифрагирующее при восстановлении голограммы в +1 порядок с учетом (1) и (2), имеет вид

$$h^*(\omega, \theta) = \sum_{k=1}^n F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta) p^{(1)}(\omega, \theta) + \sum_{k=n+1}^{2n} F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta) p^{(2)}(\omega_k), \quad (6)$$

где

$$G^+(\omega, \theta) = e^{ia\omega \cos(\theta_k - \theta)}.$$

Выполняя фурье-преобразование от (6), находим распределение амплитуд в выходной плоскости

$$M(r, \varphi) = \sum_{k=1}^n \mathcal{F}[F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta) p^{(1)}(\theta_k)] + \\ + \sum_{k=n+1}^{2n} \mathcal{F}[F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta) p^{(2)}(\omega_k)]. \quad (7)$$

Подставляя значение для  $G^+(\omega, \theta)$  и используя теорему смещения, получим для  $k$ -го члена суммы

$$M(r-a, \varphi-\theta_k) = \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(1)}(\omega_k)]\} + \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(2)}(\omega_k)]\}. \quad (8)$$

Фотоприемные устройства реагируют на интенсивность света. Согласно теореме Парсеваля, световая энергия для  $k$ -го элемента фильтра будет

$$H_k = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta) p^{(1)}(\omega_k)]^2 d\omega d\theta + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [F(\omega, \theta) \times \\ \times G^+(\omega, \theta) p^{(2)}(\omega_k)]^2 d\omega d\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(1)}(\theta_k)]\}^2 dr d\varphi + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(2)}(\omega_k)]\}^2 dr d\varphi. \quad (9)$$

В левой части выражения (9) пределы интегрирования ограничены значениями  $p^{(1)}(\theta_k)$  и  $p^{(2)}(\omega_k)$ . Как видно из выражения (8), световые распределения в выходной плоскости концентрируются вокруг точек с координатами  $r=a$ ,  $\theta=\theta_k$ . Размеры фотоприемной площадки, считывающей эти распределения (или щели обтюратора (ОБТ), через которую они считываются),  $2b$  и  $L$  должны быть выбраны так, чтобы максимальная часть световой энергии, определяемая правой частью выраже-

ния (9), была зарегистрирована фотоприемником. Учитывая сказанное, можно записать:

$$\int_{\omega_k}^{\omega_{k+1}} \int_0^\pi [F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta)]^2 d\omega d\theta + \int_0^{\omega_{\max}} \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} [F(\omega, \theta) G^+(\omega, \theta)]^2 d\omega d\theta =$$

$$= \int_{-b}^b \int_{-\frac{L}{2a}}^{\frac{L}{2a}} \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(1)}(\theta_k)]\}^2 dr d\varphi +$$

$$+ \int_{-b}^b \int_{-\frac{L}{2a}}^{\frac{L}{2a}} \{f(r, \varphi) * \mathcal{F}[p^{(2)}(\omega_k)]\}^2 dr d\varphi. \quad (10)$$

Здесь  $\omega_{\max}$  — максимальный радиус фильтра;  $L, 2b$  — размер отверстия обтюратора.

Значения световых энергий для всех  $H_k$  с помощью ОБТ последовательно вводятся в блок считывания.

Для экспериментальной проверки метода в качестве тестового материала выбирались две структуры, одна из которых содержала регулярность, другая была изотропной. Распознавание этих структур осуществлялось при помощи рекуррентных алгоритмов самообучения, основанных на применении метода стохастической аппроксимации. Характерным отличием исследуемых структур являлось то, что первая структура дает на дифракционной картине распределение энергии вдоль определенных радиальных направлений. Эти выделенные направления фиксируются элементами фильтра в виде клиньев и дают на дифракционном знаке характерные всплески. Для процесса обучения было получено по 30 дифракционных знаков каждой структуры. На рис. 3, а, б изображены дифракционные знаки, соответствующие распознаваемым классам.

В процессе обучения получено значение оптимального вектора  $C^*$ , минимизирующего функционал [3]

$$J(C) = M \left\{ F \left( y - \sum_{v=1}^N C_v \varphi_v(x) \right) \right\},$$

где  $y$  — величина, определяющая класс, к которому этот образ принадлежит;  $C$  —  $N$ -мерный вектор коэффициентов;  $\varphi(x)$  —  $N$ -мерный вектор независимых функций.

Вычисляя производную от функционала, получаем алгоритм адаптации, который при  $n \rightarrow \infty$  определяет оптимальную разделяющую

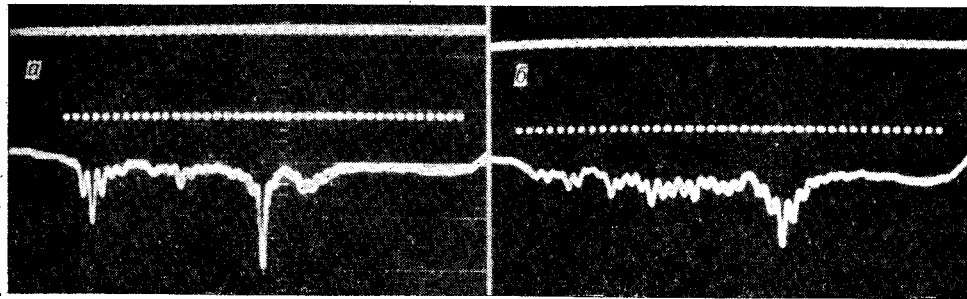


Рис. 3.

функцию

$$C_{n+1} = C_n + \gamma(y_n - \sum C_n \varphi_n(x)) \varphi_n(x)$$

( $\gamma$  — величина, влияющая на процесс сходимости).

Вектор  $C$ , полученный в результате описанной процедуры для области клиньев и полуколец, изображен на рис. 4, а, б. Выбросы вектора, соответствующие номерам клиньев три и тринадцать, указывают на распределение энергии вдоль соответствующих направлений. Затем производилось сплошное сканирование фотоснимка апертурой радиуса  $\rho$  с непрерывным вычислением решающей функции

$$R(x, y) = \sum_{k=1}^{40} C_k H_k.$$

Результат распознавания относился к точке фотоснимка, совпадающей с центром сканирующей апертуры, а решающее правило имело вид

$$(x, y) \in y_1, \text{ если } R(x, y) > 0;$$

$$(x, y) \in y_2, \text{ если } R(x, y) < 0.$$

В результате экспериментов на фотоснимке удалось выделить области с регулярной структурой, которые совпадают с областями, визуаль-но выделенными человеком. Непрерывность границ областей, как и следовало ожидать, весьма существенно зависела от апертуры  $\rho$ : при его уменьшении уточнялось положение границы, однако иногда появлялись разрывы.

Результаты экспериментов доказывают работоспособность технического решения, обеспечивающего анализ дифракционных картин. Сравнивая его с решением Лэндариса и Стэнли [1], отметим, что в данном случае вычисление вектора признаков производится практически в реальном времени. Это позволяет обеспечить непрерывное сканирование фотоснимка, а не дискретное, как у Лэндариса и Стэнли, и, следовательно, на фотоснимке с гораздо большей точностью можно очертить границы участков, принадлежащих разным классам. Такое же преимущество обеспечивает, например, фигурный фотоприемник, чувствительные элементы которого имеют соответствующую геометрию, но в этом случае процесс перехода в другое пространство признаков связан с разработкой нового фотоприемника, в то время как в предлагаемом решении изменяется лишь геометрия фильтра, трудоемкость изготовления которого значительно меньше трудоемкости изготовления фотоприемника.

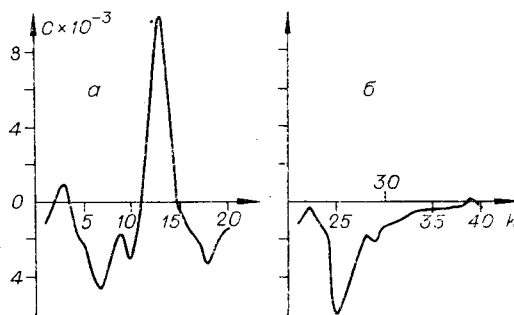


Рис. 4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лэндарис, Стэнли. Метод дискретизации дифракционных картин для автоматического распознавания образов.— «ТИИЭР», 1970, т. 58, № 2, с. 22—40.
2. Веряскин Ф. Ф., Выдрин Л. В., Давыдов В. Т., Мантуш Т. Н., Неженко Е. С., Панков Б. Н., Твердохлеб П. Е. Оптико-электронный процессор для распознавания изображений.— «Автометрия», 1975, № 3, с. 73—77.
3. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., «Наука», 1968.

Поступила в редакцию 18 апреля 1977 г.