

$S_{ni}(h_i)$  при когерентном подсвете при малом уровне шума справедливо соотношение

$$\delta S_i \sim S_{ni}(h_i)/M_i,$$

где  $M_i$  — количество пятен в изображении. В работе [3] показано, что размер пятна определяется размером элемента разрешения, т. е.

$$M_i = \frac{S_{ni}(h_i) h_i^2}{\lambda^2 z^2}. \text{ Тогда } \delta S_i \sim \frac{z^2 \lambda^2}{h_i^2}.$$

Таким образом, из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Распределение средней интенсивности поля в изображении шероховатой параболической поверхности зависит от радиуса кривизны средней поверхности, среднего наклона неровностей и от размера апертуры оптической системы, формирующей изображение.

2. При известном радиусе кривизны средней поверхности для получения оценки среднего наклона неровностей достаточно обработать одно изображение. При неизвестном радиусе кривизны средний наклон неровностей можно оценить, обработав несколько изображений, полученных при различных апертурах оптической системы, причем точность оценки определяется количеством обрабатываемых изображений, пятнистой структурой изображения при когерентном подсвете и дискретной структурой регистрирующей среды при подсвете белым светом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин С. П., Мандросов В. И. Определение качества диффузных неплоских поверхностей по их когерентным изображениям.— В кн.: Труды II Всесоюз. научно-технической конференции «Применение ОКГ в приборостроении». М.: МВТУ, 1979.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности.— М.: Наука, 1972.
3. Устинов Н. Д. и др. Анализ качества лазерных изображений диффузных объектов.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 6, с. 1257.
4. Галун С. А., Зюльков А. В., Трифонов А. П. Оценка площади оптических изображений на фоне шумов.— Автометрия, 1983, № 1.
5. Зайдель А. Н. Ошибки измерения физических величин.— Л.: Наука, 1972.

Поступило в редакцию  
30 марта 1984 г.

УДК 621.391.26

С. А. ПАВЛИЧЕНКОВ, В. И. ПРОТАСЕВИЧ, Ш. И. САДЫКОВ,  
А. Ф. СКОЧИЛОВ  
(Казань)

#### АЛГОРИТМ, РЕАЛИЗУЮЩИЙ ОРИЕНТАЦИОННО-МАСШТАБНУЮ ИНВАРИАНТНОСТЬ В ПРОБЛЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Методы когерентно-оптической обработки информации находят широкое применение в различных отраслях науки и техники, в частности, при разработке систем распознавания образов. Основным недостатком этих систем является их чувствительность к ориентации объекта и изменению его масштаба по отношению к эталону [1].

Наиболее перспективны в этом отношении гибридные оптико-электронные комплексы, позволяющие сочетать высокое быстродействие оптических методов с широкими возможностями электронных устройств различного назначения.

В данной работе для когерентных оптико-электронных систем приводится алгоритм, позволяющий распознавать объекты независимо от их ориентации и масштаба.

Рассмотрим объект, характеризуемый функцией пропускания  $t_0(x, y)$ . Распределение интенсивности, полученное в фурье-плоскости линзы прямого преобразования Фурье, расположенной вплотную к объекту, будет пропорционально квадрату модуля фурье-образа объекта:

$$\begin{aligned} I_0(f_x, f_y) &= A |T_0(f_x, f_y)|^2; \\ T_0(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[t_0(x, y)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathcal{F}[\ ]$  — оператор фурье-преобразования;  $f_x$  и  $f_y$  — пространственные частоты в

плоскости Фурье;  $A$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности оптической схемы.

Перейдем к полярной системе координат в частотной плоскости:

$$\begin{aligned} f_x &= \rho \cdot \cos \varphi; & \rho &= \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \\ f_y &= \rho \cdot \sin \varphi; & \varphi &= \arctg(f_y/f_x). \end{aligned}$$

Тогда  $I'_0(f_x, f_y) = I_0(\rho, \varphi)$ . Проинтегрируем  $I_0(\rho, \varphi)$  по  $\varphi$  и обозначим полученную величину через  $\Phi_0(\rho)$ :

$$\Phi_0(\rho) = \int_0^{2\pi} I_0(\rho, \varphi) d\varphi. \quad (2)$$

Функция  $\Phi_0(\rho)$  очевидным образом инвариантна относительно ориентации объекта  $t_0(x, y)$ .

Введем теперь нормированную функцию  $N(\rho)$ :

$$N_0(\rho) = \frac{\Phi_0(\rho)}{\Phi_0(0)} = \frac{\int_0^{2\pi} |T_0(\rho, \varphi)|^2 d\varphi}{2\pi |T_0(0, 0)|^2}. \quad (3)$$

Функция  $N_0(\rho)$  одинакова для объектов, отличающихся от  $t_0(x, y)$  сдвигом, ориентацией и коэффициентом  $A$ .

Рассмотрим теперь объект  $t_1(x, y)$ , отличающийся от  $t_0(x, y)$  изменением масштаба:

$$t_1(x, y) = t_0(ax, ay).$$

Согласно теореме подобия [2]

$$\mathcal{F}[t_1(x, y)] = (1/a^2) T_0(f_x/a, f_y/a). \quad (4)$$

Для нового объекта с учетом (4)

$$N_1(\rho) = \frac{\int_0^{2\pi} |T_0(\rho/a, \varphi)|^2 d\varphi}{2\pi |T_0(0, 0)|^2} = N_0(\rho'); \quad \rho' = \rho/a. \quad (5)$$

Таким образом, для подобных объектов  $N_1(\rho)$  есть результат масштабного преобразования  $N_0(\rho)$ .

Выберем некоторую совокупность пространственных частот  $\{\rho_k\}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), удовлетворяющую условию  $0 < \rho_1 < \rho_2 < \rho_3 \dots$  и включающую в себя все максимумы и минимумы кривой  $N_0(\rho)$ . Этой совокупности  $\{\rho_k\}$  отвечает совокупность значений  $\{N_0(\rho_k)\}$ . Выберем пространственную частоту  $\rho_1$ , которой соответствует значение  $N_0(\rho_1)$ . Будем теперь двигаться по кривой  $N_1(\rho)$  начиная от  $\rho = 0$  до значения  $\rho = \rho'_1$ , при котором  $N_1(\rho'_1) = N_0(\rho_1)$ . Далее, рассмотрим значение  $N_0(\rho)$  в точке  $\rho_2$ . Двигаясь по кривой  $N_1(\rho)$  от точки  $\rho = \rho'_1$ , найдем значение  $\rho = \rho'_2$ , при котором  $N_1(\rho'_2) = N_0(\rho_2)$ . Продолжая этот процесс, получим совокупность пространственных частот  $\{\rho'_k\}$ , соответствующую  $\{\rho_k\}$ , такую, что последовательности  $\{N_1(\rho'_k)\}$  и  $\{N_0(\rho_k)\}$  будут тождественны, т. е.  $N_1(\rho'_k) = N_0(\rho_k)$ .

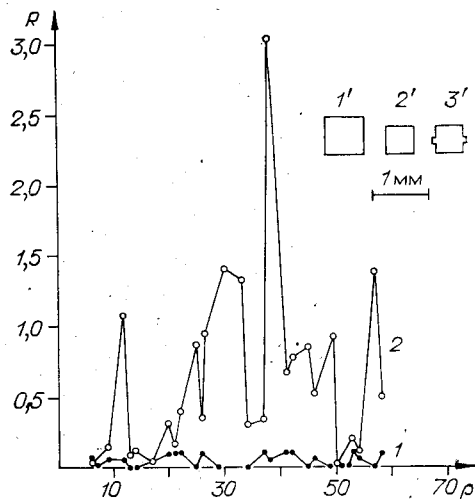
Если  $\{\rho_k\}$  есть непрерывная последовательность пространственных частот, можно ввести функцию

$$R(\rho) = \left| \rho \frac{d}{d\rho} \left[ \frac{N_1(\rho)}{\rho} \right] \right|, \quad (6)$$

где  $\rho'_k(\rho)$  — значения из непрерывной совокупности  $\{\rho'_k\}$ . Для объектов, отличающихся от  $t_0(x, y)$  коэффициентом  $A$ , сдвигом, ориентацией и масштабom, функция  $R(\rho) \equiv 0$ , так как из (5) следует, что  $\rho'_k(\rho)/\rho = 1/a = \text{const}$ . Для всех других объектов  $R(\rho) \neq 0$ .

Таким образом, функция  $R(\rho)$  может служить критерием сходства сравниваемых объектов.

С целью экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого алгоритма был использован упрощен-



ный вариант устройства дискретизации дифракционных спектров, подробно описанного в [3]. Это устройство имеет следующие характеристики: динамический диапазон входных сигналов 100 дБ, длина волны лазерного излучения 0,63 мкм, фокусное расстояние объектива фурье-преобразования 450 мм, шаг сканирования 0,05 мм, ширина щели сканирования 0,05 мм.

На рисунке приведены изображения объектов, использованных для проверки алгоритма, и зависимости  $R(\rho)$  для этих объектов. Кривая 1 получена в результате сравнения квадратов  $1'$  и  $2'$  со сторонами 0,7 и 0,5 мм соответственно; кривая 2 — в результате сравнения квадрата  $1'$  и фигуры  $3'$ , имеющей незначительные отличия от квадрата  $2'$ . Значения кривой 1 не равны строго нулю вследствие конечных размеров сканирующей щели и дискретного шага сканирования.

Полученные результаты указывают на возможность распознавания объектов по данному алгоритму.

*Поступило в редакцию  
19 апреля 1984 г.*

УДК 621.382 : 621.3.087.25

Л. К. ИСХАКОВА, А. Ю. МОЛОТОВА, И. В. ЩУКИН  
(Москва)

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПРИЯТИЯ ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Учет психофизики восприятия важен при исследовании структуры точечных изображений в ряде прикладных задач астрономии, медицины, газодинамики двухфазных потоков.

Основная задача первого этапа визуального анализа структуры точечного изображения заключается, как правило, в установлении особенностей пространственного размещения его элементов (точек). Простейшим является пуассоновское размещение, которое характеризуется отсутствием корреляций в размещении элементов изображения. Наличие корреляций в расположении элементов может быть связано с особенностью структуры исходного объекта, представленного изображением, либо с применением трансформационных преобразований в процессе получения изображения [1, 2]. Так, один из перспективных способов измерения скорости потока частиц состоит из двухэкспозиционной фотографической или голографической регистрации исходного потока. Поле скоростей потока частиц описывается при этом расстояниями между изображениями частиц, полученными при первой и второй экспозициях, т. е. в расстояниях определенных (двухэкспозиционных) пар частиц [2]. При значительной концентрации частиц в потоке структура двухэкспозиционного изображения сложна даже при простом поле скоростей, что существенно затрудняет получение достоверных результатов при визуальном анализе. В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент двухэкспозиционного изображения простейшего односкоростного однонаправленного потока частиц, для которого все двухэкспозиционные пары имеют одинаковые размеры и ориентацию. Визуальный анализ данного изображения сталкивается со значительными трудностями уже на этапе поиска частиц, входящих в двухэкспозиционные пары.

Двухэкспозиционное изображение является примером изображения, особенности структуры которого связаны с применением трансформационных преобразований в процессе его получения. Однако изображение типа приведенного на рис. 1 интерпретируется и другим способом. Его можно рассматривать как изображение модели объекта, в котором произошла простейшая структурная перестройка: от пуассоновского размещения к размещению, содержащему фиксированные пары элементов. Пример изображения на рис. 1 демонстрирует тот факт, что в ряде случаев существенное изменение структуры изображения весьма сложно обнаружить визуально.

Рассмотрим условия проведения экспериментов [3]. Приведем значения основных параметров предъявлявшихся операторам точечных изображений: формат  $250 \times 250$  мм; размер отдельной точки 3 мм; число групп точек 100; центры групп размещены в пределах площади изображения по закону Пуассона; вид групп: двухэкспозиционные пары; точки, расположенные в вершинах равностороннего треугольника (триады точек); точки в вершинах квадрата (четверки точек); размер групп