

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 62.50 : 621.391.156

О. М. КАРПОВА, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, Г. Д. УМАНЦЕВ

(Новосибирск)

### РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ НА ФОТОСНИМКАХ

Решение задачи распознавания объектов известной формы по их изображениям на фотоснимке существенно затрудняется, если при фотосъемке объект находится на неизвестном фоне, условия освещения его изменяются в широких пределах и фотосъемка производится через среду с неизвестной характеристикой рассеяния. Распространенные методы распознавания изображений детерминированных объектов путем сравнения значений пропускания фотоснимка в каждой точке с эталонными значениями [1] оказываются малоэффективными. Это связано с тем, что при указанных условиях съемки дисперсия закона распределения значений пропускания фотоснимка весьма велика, поэтому классы изображения объекта и шума в пространстве признаков, представляющих собой величину пропускания в каждой точке фотоснимка, перекрываются, и, следовательно, показатель качества распознавания оказывается низким. Повысить качество распознавания можно за счет предварительного оконтуривания изображения объекта, однако и этот путь не приводит к цели, так как разрешение изображения объекта от фотоснимка к фотоснимку, определяемое рассеивающей способностью среды, через которую проводилась съемка, изменяется в широких пределах.

В настоящей работе на основании анализа различных систем признаков изображения и критериев распознавания выбирается алгоритм распознавания, обеспечивающий инвариантность показателя качества распознавания к разрешению фотоснимка и к изменению его пропускания в широких пределах. Достигается это, с одной стороны, за счет выбора признаков, имеющих малую дисперсию закона распределения для данного фотоснимка, с другой — путем использования в решающей функции непараметрических критериев, обеспечивающих хорошее качество распознавания в широком классе законов распределений признаков.

Рассмотрим одну из возможных моделей участка фотоснимка с изображением распознаваемого объекта и фона. Допустим, что изображение объекта можно разбить на участки, в пределах которых пропускание постоянно с точностью до аддитивного шума (чаще всего эти участки соответствуют плоскостям равного наклона на объекте). Аналогичное предположение делается и об изображении фона. Введем обозначения:  $T(x, y)$  — функция пропускания фотоснимка с изображе-

нием,  $x, y$  — пространственные координаты,  $\Omega_i^3$  — область равной освещенности на изображении объекта,  $\Omega_i^\Phi$  — область равной освещенности на изображении фона. Тогда пропускание распознаваемого участка  $\bar{\Omega} = \sum_{i=1}^m \Omega_i^3 + \sum_{j=1}^n \Omega_j^\Phi$  можно описать выражением

$$T(x, y) = T^3(x, y) + T^\Phi(x, y) = k^3(\bar{c}^3 + \bar{u}^3) + n^3(x, y) + k^\Phi(\bar{c}^\Phi + \bar{u}^\Phi) + n^\Phi(x, y). \quad (1)$$

Здесь  $k^3$  и  $k^\Phi$  — коэффициенты, характеризующие среднее пропускание фотоснимка в областях эталона и фона;  $\bar{c}^3(c_1^3, c_2^3, \dots, c_m^3)$  и  $\bar{c}^\Phi(c_1^\Phi, c_2^\Phi, \dots, c_n^\Phi)$  — детерминированные векторы, составляющие которых зависят от коэффициентов отражения поверхности объекта и участков фона при определенном положении источника освещения;  $\bar{u}^3(u_1^3, u_2^3, \dots, u_m^3)$  и  $\bar{u}^\Phi(u_1^\Phi, u_2^\Phi, \dots, u_n^\Phi)$  — случайные векторы отклонения истинных значений пропускания областей фотоснимка от расчетных;  $n^3(x, y)$  и  $n^\Phi(x, y)$  — аддитивный случайный шум, присутствующий на фотоснимке.

Рассмотрим алгоритмы распознавания для случая, когда неизвестные параметры в выражении (1) могут быть вычислены или измерены при следующих допущениях:  $\bar{u}^3 = \bar{u}^\Phi = 0$ ,  $c_1^3 = c_2^3 = \dots = c_m^3$ , и  $n^\Phi$  — белый нормальный шум. Тогда оптимальное решающее правило, минимизирующее средний квадрат ошибки распознавания, формулируется таким образом. Изображение объекта присутствует, если

$$R = \iint_{\Omega^3} T(x, y) T^3(x, y) dx dy = k^3 \sum_{i=1}^m \iint_{\Omega_i^3} T(x, y) dx dy \geq H, \quad (2)$$

где  $k^3 = \frac{1}{\iint_{\Omega} T^2(x, y) dx dy}$ , коэффициенты  $c_i^3$  должны быть определены априорно.

Предположение о равенстве нулю векторов  $\bar{u}^3$  и  $\bar{u}^\Phi$ , а также необходимость априорного нахождения вектора  $\bar{c}^3$  в сильной степени ограничивают область применения решающего правила (1). Поэтому перейдем к другой системе признаков, которая позволяет найти решающее правило, требующее меньшего количества априорной информации, и дает возможность ослабить ограничения, накладываемые на законы распределения признаков.

При выборе признаков будем исходить из предположения о том, что класс объекта определяется контуром его изображения на фотоснимке. Разобьем контур  $S$  на  $m$  участков  $S_i (i=1, 2, \dots, m)$  и выделим по обе стороны от контура малые области  $\Omega_i$  размером  $s_i \times b$ . Значение среднего пропускания фотоснимка в каждой из областей  $W_i = \iint_{\Omega_i} T(x, y) dx dy$  будет представлять собой случайную величину,

а их совокупность для всего контура — дискретный случайный процесс. В терминах модели изображения:  $W_i^3 = k^3(c_i^3 + u_i^3)$ ;  $W_i^\Phi = k^\Phi(c_i^\Phi + u_i^\Phi)$ .

Пусть плотности распределения случайных величин  $W^3$  и  $W^\Phi$  будут соответственно  $F^3$  и  $F^\Phi$ . Сформулируем гипотезу  $P_1: F^3 = F^\Phi$ . Из подтверждения этой гипотезы следует то, что изображение объекта в области, ограниченной контуром, отсутствует. Гипотеза проверяется при альтернативе  $k_1: F^3 \neq F^\Phi$ .

Критерий, основанный на проверке гипотезы  $P_1$ , дает хорошие результаты, если  $F^3$  и  $F^\Phi$  обладают малыми дисперсиями. В противном случае плотности распределения для изображения объекта и шума пе-

рекрываются, в результате чего проверка гипотезы  $P_1$  становится затруднительной.

Эту трудность можно преодолеть, если перейти к другой системе признаков, закон распределения которых для шума (под ним понимается изображение фона) имеет меньшую дисперсию, чем законы распределения  $W_i^z$  и  $W_i^f$ . При этом будем исходить из следующих соображений. Если размер областей  $\Omega_i^z$  и  $\Omega_i^f$  выбрать так, чтобы высокочастотный шум, присутствующий на фотоснимке, усреднялся, величины  $W_i^z$  и  $W_i^f$ , характеризующие среднее пропускание в близлежащих областях, будут мало отличаться тогда, когда обе области попадают либо в область изображения объекта, либо шума. При этом случайная величина  $V_i = \frac{W_i^z - W_i^f}{W_i^z + W_i^f}$  (знаменатель  $W_i^z + W_i^f$  осуществляет нормировку  $W_i$  по среднему значению пропускания фотоснимка в области  $\Omega_i^z + \Omega_i^f$ ) будет иметь близкое к 0 математическое ожидание (или медиану) и малую дисперсию. Исходя из этих соображений, сформулируем нулевую гипотезу  $P_2: F(V_i^p) = F(V_i^m)$ , где  $F(V_i^m)$  и  $F(V_i^p)$  — соответственно плотности распределения случайных величин  $V^m$  и  $V^p$ , представляющих собой значения величин  $V$  для заведомого шума и распознаваемого участка изображения. Проверка этой гипотезы осуществлялась по одному параметру — относительному сдвигу медиан  $F(V_i^p)$  и  $F(V_i^m)$  [2]. Если на фотоснимке изображение объекта присутствует и контур его совпадает с контуром эталона, то области  $\Omega_i^z$  попадут на изображение объекта, а области  $\Omega_i^f$  — на изображение фона, что приведет к сдвигу закона распределения величины  $|V_i|$  в положительную сторону. Решающее правило с непараметрическим ранговым критерием, позволяющим оценить относительный сдвиг законов распределений  $V_i^p$  и  $V_i^m$ , изменяющихся в широких пределах, формулируется таким образом. Изображение объекта в области, ограниченной контуром эталона, отсутствует, если

$$R = \sum_{r=1}^m d_r < H, \text{ где } d_r = \begin{cases} 0, & \text{если } |W_i| \leq h, \\ r, & \text{если } |W_i| > h, \end{cases} \quad (3)$$

$h$  — сдвиг медианы закона распределения  $V^m$  относительно начала координат, оцениваемый по фотоснимку, порог  $H$  определяется вероятностью ложной тревоги.

Необходимость нахождения порога  $h$  по фотоснимку — существенный недостаток рангового решающего правила. Этого недостатка лишено другое решающее правило, основанное на нулевой гипотезе о том, что признаки  $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) независимы. Эта гипотеза исходит из предположения (подтверждаемого экспериментальными результатами), что если между признаками имеется статистическая зависимость, свидетельствующая о существовании закономерности на контуре, по которому измерены признаки, то это может трактоваться как наличие изображения объекта в области, ограниченной этим контуром. При проверке нулевой гипотезы о независимости признаков также целесообразно применять непараметрические критерии [3]. Решающее правило, использующее критерий серий, формулируется так. Изображение объекта отсутствует, если

$$r_n; 1-\alpha/2 < r < r_n; \alpha/2,$$

где  $r$  — число серий, представляющих собой последовательности  $V_i$  с одинаковым знаком, перед и после которых расположены  $V_i$  другого знака или значения отсутствуют вообще. Величины  $r_n; 1-\alpha/2$  и  $r_n; \alpha/2$  —

граничные значения гипотезы с уровнем значимости  $\alpha$ , находящиеся из таблиц [3].

Рассмотрим еще один важный вопрос — выбор областей  $\Omega_i$ , по которым производится усреднение пропускания с целью получения признаков  $W_i^a$  и  $W_i^f$ . Их можно охарактеризовать тремя параметрами: длиной области по контуру  $s$  (или связанным с этой величиной числом участков  $m$ ), шириной области  $b$  и расстоянием  $a$  между областями, находящимися по обе стороны от контура. Длина области должна выбираться с учетом независимости случайных величин  $W_i$  и  $W_{i+1}$  в отсутствие изображения объекта. Ширина области должна быть такой, чтобы на значение  $W_i$  не оказывал влияние высокочастотный шум от зернистости фотоматериала. Расстояние между областями должно обеспечить инвариантность величин  $V_i$  к разрешению изображения объекта.

Поскольку аналитический расчет влияния перечисленных факторов на качество распознавания затруднен, при решении конкретной задачи распознавания выбор параметров производился путем моделирования процесса распознавания на ЭВМ. Для оценки качества распознавания использовалась величина  $\eta = R_c/R_m$ , где  $R_c$  и  $R_m$  — значения решающей функции при наличии изображения объекта и при его отсутствии соответственно. Эта величина (а не используемая в подобных случаях вероятность правильного обнаружения) применялась из-за ограниченной статистики изображений объектов.

При машинном моделировании проводилось сканирование фотоснимка, значения пропускания точек фотоснимка вводились в ЭВМ, затем в соответствии с информацией об эталоне, хранящейся в памяти ЭВМ, производилось усреднение пропускания внутри каждой области, после чего применялось то или иное решающее правило.

Экспериментальная проверка рассмотренных решающих правил проводилась путем распознавания изображений одного и того же объекта, сведенных в тест-таблицу. Контраст и разрешение изображений менялись соответственно от 0,05 до 0,6 и от 20 до 36 лин/мм. По нескольким изображениям из тест-таблицы методом машинного моделирования определялись параметры  $b$ ,  $l$ ,  $a$  и  $m$ , дающие максимальное значение величины  $\eta$ . По этим параметрам был изготовлен специальный голографический фильтр для оптико-электронного процессора [4], на котором проверялись рассмотренные выше решающие правила для всех изображений тест-таблицы. Результаты распознавания бестеневых объектов по ранговому критерию отражены на рисунке, по критерию серий — в таблице. На графиках и в таблице приведены значения решающих функций  $R$  и  $r$  в зависимости от контраста объект — фон и разрешения для случаев присутствия изображения объекта и шума.

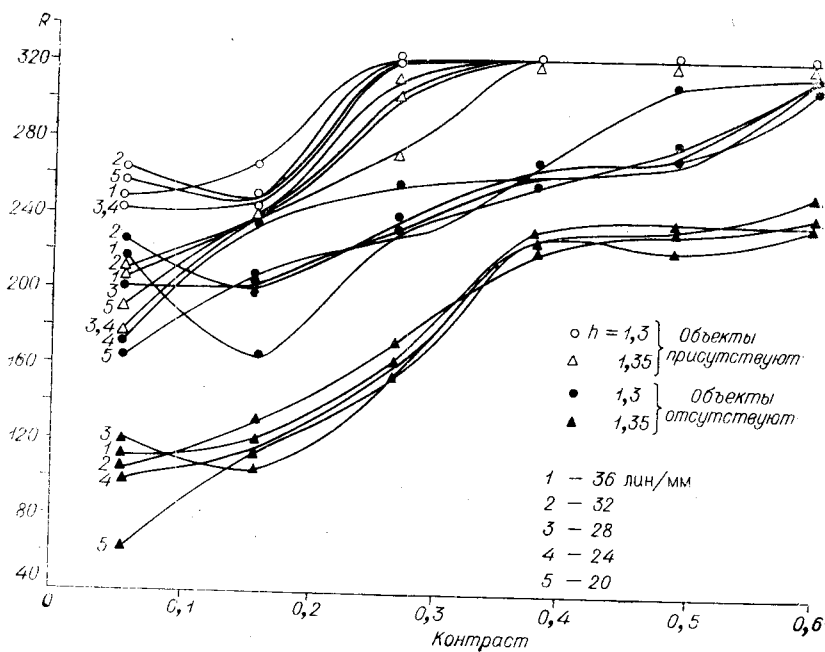
Были также проведены эксперименты по распознаванию объектов, отбрасывающих тени, и исследования влияния изменения ориентации изображения объекта и малых искажений контура объекта относительно эталона. Основываясь

на проведенном исследовании и экспериментальных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Выбранная система признаков дает результаты распознавания, инвариантные к разрешению изображения объекта.

2. Значение решающей функции с критерием серий не зависит от

$r$	Число изображений со значением решающей функции $r$		
	объект на изображении есть	объекта на изображении нет	
1	29	0	} Критическая область
2	1	0	
3	0	3	} Область принятия гипотезы
4	0	5	
5	0	16	
и выше			



контраста между изображением объекта и фона, начиная с некоторой пороговой величины контраста. Значение решающей функции с ранговым критерием снижается при уменьшении контраста, поэтому для ограничения вероятности ложной тревоги необходимо задавать несколько значений порога  $h$ , определяемого путем априорной оценки фотоснимка.

3. Если распознаваемый объект отбрасывает тень, решающее правило с ранговым критерием дает лучший результат распознавания, чем решающее правило с критерием серий. Это объясняется тем, что тени вызывают реверс контраста, к которому чувствителен критерий серий, в отличие от рангового критерия, использующего абсолютные значения контраста.

4. Этим же свойством критерия серий объясняется и то, что он весьма критичен к изменению ориентации и конфигурации изображения объекта, поскольку такое изменение приводит, как правило, к пересечению контуром изображения объекта контура эталона, и знак контраста изменяется на противоположный.

5. Сравнение результатов распознавания изображений по параметрическому корреляционному критерию с предварительным оконтуриванием изображений и по непараметрическим критериям, использующим предложенную в настоящей работе систему признаков, показало, что при одной и той же априорной информации качество распознавания во втором случае значительно выше, чем в первом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Ковалевский. О корреляционном методе распознавания.— В кн.: Читающие автоматы и распознавание образов. Киев, «Наукова думка», 1965.
2. Томас. Непараметрические методы обнаружения сигналов.— «ТИИЭР», 1970, № 5.
3. Дж. Бендат, А. Пирсол. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир», 1971.
4. Ф. Ф. Веряскин, Л. В. Выдрин, В. Т. Давыдов, Т. Н. Мантуш, Е. С. Нежевенко, Б. Н. Панков, П. Е. Твердохлеб. Оптико-электронный процессор для распознавания изображений.— «Автоматика», 1975, № 3.

Поступила в редакцию 30 января 1975 г.