

3. Водоватов И. А., Высоцкий М. Г., Лавров А. Ц., Рогов С. А. Оптическое моделирование диаграмм направленности антенных устройств с использованием многоэлементных ПЭС-фотоприемников.— Автометрия, 1983, № 1.
4. Бухарин Н. А., Есепкина Н. А., Котов Ю. А., Михайлов А. В. Гибридный оптико-цифровой акустооптический коррелятор.— Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, вып. 2.
5. Афанасьев С. Я., Бородин С. М., Стенин В. Я. Программируемое устройство управления матричным формирователем видеосигнала на ПЭС.— Автометрия, 1983, № 3.
6. Гольдшер А. И. и др. Управление матрицами элементов с зарядовой связью.— Электрон. пром-сть, 1982, № 7.
7. Байкин И. А., Фельдберг К. X. Сокращение объема цифровой памяти при записи изображений.— Техника средств связи. Сер. Техн. телевидения, 1982, вып. 2 (34).

Поступила в редакцию 12 января 1984 г.

УДК 535.317.2 : 681.332

В. И. КОЗИК, А. Н. ОПАРИН, О. И. ПОТАТУРКИН

(Новосибирск)

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР С ОБРАБОТКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

В [1, 2] рассмотрены оптико-электронные процессоры (ОЭП) на основе голографических корреляторов интенсивности (ГКИ) с оперативным оптическим вводом и оконтуриванием обрабатываемых изображений (ОИ). Такие ОЭП предназначены для решения задач распознавания изображений заданной конфигурации в поле наблюдения и определения их координат. Проведенные экспериментальные исследования показали хорошую работоспособность созданных ОЭП при оперативном распознавании двухградационных тестовых и реальных полутонных изображений, причем в качестве функции сходства выбиралась корреляционная функция оконтуренного ОИ и эталонного изображения (ЭИ). Однако в этих работах не рассматривались вопросы инвариантности процесса распознавания к таким геометрическим преобразованиям ОИ, как изменение масштаба, ориентации и т. п. При этом наибольший интерес с нашей точки зрения представляет инвариантность к ракурсным преобразованиям ОИ, т. е. к таким преобразованиям, которые приводят к изменению не только параметров, но и формы изображений.

Кроме того, в условиях априорной неопределенности коэффициент корреляции как мера сходства далеко не всегда обеспечивает достоверное распознавание даже при расширении класса решающих функций, например, за счет выбора параметра расфокусировки при оконтуривании ОИ и профиля контура ЭИ [1]. Согласно [3] один из методов повышения надежности функционирования ОЭП заключается в цифровой обработке полученной корреляционной функции после сжатия информации на выходе ГКИ. Поэтому в данной работе исследуется возможность повышения достоверности распознавания за счет дополнительной цифровой обработки корреляционной функции с помощью клеточных операторов, а также приводятся результаты экспериментального исследования ОЭП, в котором реализован инвариантный к ракурсным преобразованиям процесс распознавания изображений реальных объектов.

Выше отмечалось, что ракурсные преобразования в отличие от масштабных и ориентационных приводят к изменению формы изображений, т. е. для каждого ракурса ОИ необходимо соответствующее ему ЭИ. Следовательно, процесс распознавания в этом случае реализуется с помощью параллельного или последовательного перебора эталонов (конечно, возможны и промежуточные варианты). С точки зрения производительности ОЭП наиболее предпочтительна параллельная (многоканальная)

обработка, однако при этом необходимо учитывать возможности фотосчитывающих устройств, а также уменьшение пропускной способности каждого канала. Так, при полной пропускной способности процессора N_0 и количестве перебираемых при обработке ракурсов K в каждом канале параллельно обрабатывается $N = N_0/K$ элементов. Поэтому в рамках каждой решаемой задачи необходимо оптимизировать эти параметры.

В данной работе использовался ОЭП, состоящий из ГКИ с управляемым транспарантом (УТ) типа ПРИЗ на входе и телевизионной камерой на выходе [2], генератора ячеек [3] и микроЭВМ «Электроника 60», связанных между собой магистралью КАМАК. МикроЭВМ обеспечивала управление УТ и фотосчитывающего устройства, а также цифровую обработку корреляционных функций. Структура и характеристики оптического блока ОЭП совпадали с приведенными в [2]. Отличие заключалось лишь в использовании фототермопластика для оперативной регистрации голографических фильтров [3].

В качестве ОИ выбирались изображения двух классов реальных объектов (детали промышленного производства) $f^n(r, \alpha)$ (r — двумерные пространственные координаты, $n = 1, 2$), расположенных в горизонтальной плоскости с углом места 6° (угол наблюдения относительно горизонта) и произвольной ориентацией (азимутальным углом α). Результирующие геометрические преобразования в этом случае являлись ракурсными, поэтому для каждого значения азимутального угла с шагом 15° было сформировано соответствующее контурное ЭИ одного из двух рассматриваемых классов $h^m(r, \beta)$, где m и β — номер класса и азимутальный угол эталонов. Следовательно, число параллельных каналов равнялось $K = 24$ и для пропускной способности ГКИ, равной $N_0 = 10^3 \times 10^6 = 10^9$ элементов, в каждом из этих каналов параллельно обрабатывалось $N = 4 \cdot 10^4$ элементов. Обобщенный импульсный отклик представлял собой матрицу эталонов 3×8 и регистрировался в виде голограммы Фурье со случайной фазовой маской.

В процессе распознавания ОИ проецировались на УТ, где они оперативно регистрировались и оконтуривались, т. е. силуэтные $f^n(r, \alpha)$ преобразовывались в контурные $f^n(r, \alpha)$. Тогда на выходе ГКИ параллельно формировался набор из 24 корреляционных функций по параметру β , каждая из которых пропорциональна

$$g^{nm}(r, \alpha, \beta) = |f^n(r, \alpha)|^2 * |h^m(r, \beta)|^2. \quad (1)$$

Кроме того, в тестовых экспериментах на вход ГКИ, минуя УТ, подавались зарегистрированные на фото пленке ЭИ. В этом случае световое распределение в выходной плоскости ГКИ состояло также из 24 корреляционных функций, пропорциональных

$$g_0^m(r, \alpha, \beta) = |h^m(r, \alpha)|^2 * |h^m(r, \beta)|^2, \quad (2)$$

причем коррелируемые изображения принадлежали одному классу. На рис. 1, а, б приведены осциллограммы световых распределений, пропорциональных соответственно $g_0^1(r, 210^\circ, \beta)$, $g^{11}(r, 210^\circ, \beta)$, вдоль всех трех строк корреляционных функций через условные центры ОИ. Таким образом, согласно размерности обобщенного импульсного отклика, каждая строка состоит из 8 корреляционных функций по угловому параметру β с пространственными координатами r внутри каждой из них. Видно, что результаты оперативной обработки в ОЭП реальных изображений хорошо соответствуют результатам, полученным при обработке ЭИ на фото пленке, за исключением незначительной потери разрешения. Два пика ($\beta = 150, 210^\circ$) обусловлены некоторой симметрией ОИ и, следовательно, ЭИ. Причем для значений β вблизи 0 и 180° существует симметрия для пар $\beta, 360^\circ - \beta$ и $\beta, 180^\circ - \beta$, а для значений β около 90 и 270° — для пар $\beta, 180^\circ + \beta$. Симметрия второго типа хорошо видна на рис. 2, а, б, где приведены аналогичные осциллограммы световых распределений, пропорциональных $g_0^1(r, 285^\circ, \beta)$ и $g^{11}(r, 285^\circ, \beta)$. Корреляционные пики

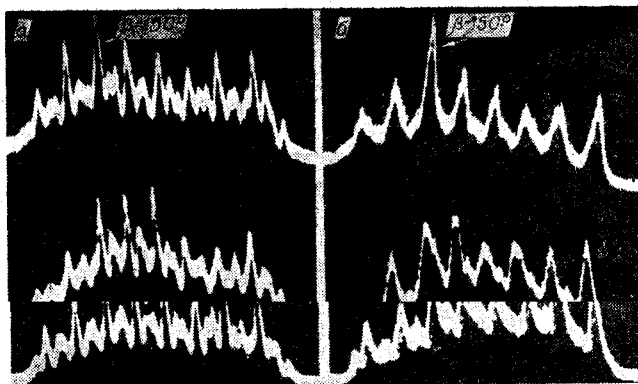


Рис. 1.

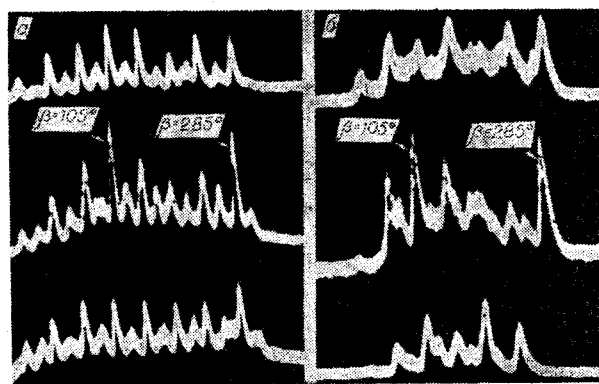


Рис. 2.

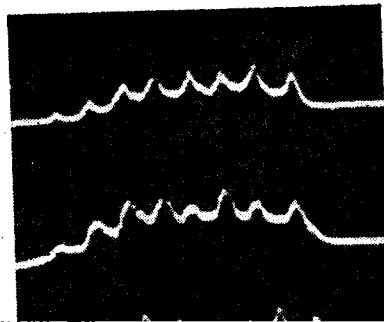
в этом случае соответствуют значениям $\beta = 105, 285^\circ$. Экспериментальные результаты для ОИ и ЭИ различных классов показаны на рис. 3, где даны осциллограммы световых распределений, соответствующих $g^{21}(r, 210^\circ, \beta)$. Видно, что корреляционные функции в этом случае существенно отличаются от $g^{11}(r, \alpha, \beta)$ и похожи на шумовые изображения. Другими словами, используя в качестве функций сходства корреляционные функции оконтурированных ОИ и контурных ЭИ, в созданном ОЭП удалось провести достоверное распознавание на основе проверки нулевых (по числу классов) гипотез с помощью решающего правила

$$\begin{cases} \max_m \max_\beta \max_r g^{nm}(r, \alpha, \beta) > z_m, & n = m; \\ \max_m \max_\beta \max_r g^{nm}(r, \alpha, \beta) \leq z_m, & n \neq m, \end{cases} \quad (3)$$

где z_m — соответствующее каждому классу пороговое значение.

Однако из осциллограмм на рис. 1, 2 следует, что для объектов данных классов пиковые значения автокорреляционных функций не более чем в 2 раза превышают значения кросс-корреляционных функций. Поэтому с целью повышения достоверности распознавания, как уже отмечалось выше, необходимо перейти от системы первичных признаков

(корреляционные отсчеты) к системе вторичных признаков (преобразованные корреляционные отсчеты) и на ее основе формировать функции сходства с более высокими дискриминантными свойствами. В данной работе для этого предлагается выполнить цифровую обработку корреляционных функций с помощью клеточных операторов, рассмотренных в [4]. Поскольку такая обработка осуществляется



В этом случае телевизионный кадр ДКМ... малое значение в каждой из них сравнивается с порогом и в зависимости от результата сравнения ячейкам присваиваются значения 1 или 0. Таким образом, формируются 16 бинарных матриц размерностью 16×16 , которые после объединения и перекомпоновки преобразуются в одну 16-градационную матрицу с цифровыми значениями и той же размерностью, т. е. генератор ячеек помимо сжатия информации выполняет роль АЦП с перестраиваемыми от ЭВМ уровнями.

Рассмотрим алгоритм обработки корреляционных функций. Без ограничения общности опустим в (1) и (2) индексы классов и условные параметры ракурсов. Тогда после сжатия информации аналоговая корреляционная функция $g(r)$ представляется в виде цифровой матрицы g_{ij} , в которой с помощью линейных и нелинейных методов контрастирования осуществляется «подчеркивание перепадов», т. е. увеличивается ее динамический диапазон [4]. При этом преобразования являются не поточечными, а локальными и их ядра задаются в виде матриц размерностью 3×3 .

Простейшие дискретные методы контрастирования заключаются в дифференцировании в конечных разностях обрабатываемых массивов. Однако с точки зрения изотропности обработки целесообразно использовать различные модификации оператора Лапласа, вид которых приведен на рис. 4. В этом случае система вторичных признаков

$$g_{ij}^{(1)-(3)} = \sum_{k,l=1}^3 g_{i+3-k, j+3-l} h_{kl}^{(1)-(3)}. \quad (4)$$

Из выражения (4) и вида импульсных откликов $h_{kl}^{(1)-(3)}$, полный интеграл которых равен нулю, следует инвариантность полученных признаков к аддитивным помехам.

В работе использовались также нелинейные преобразования

$$g_{ij}^{(4)} = \frac{\sum_{k,l=1}^3 g_{i+3-k, j+3-l} h_{kl1}^{(4)}}{\sum_{k,l=1}^3 g_{i+3-k, j+3-l} h_{kl2}^{(4)}}; \quad (5)$$

$$g_{ij}^{(5)} = \frac{\sum_{s=1}^3 \left(\sum_{k,l=1}^3 g_{i+3-k, j+3-l} h_{kls}^{(5)} \right)^2}{\left(\sum_{k,l=1}^3 g_{i+3-k, j+3-l} h_{kl2}^{(4)} \right)^2}. \quad (6)$$

Вид импульсных откликов $h_{kl1}^{(4)}$, $h_{kl2}^{(4)}$, $h_{kls}^{(5)}$ представлен на рис. 5. Из выражений (5), (6) следует инвариантность $g_{ij}^{(4)}$ к мультипликативным,

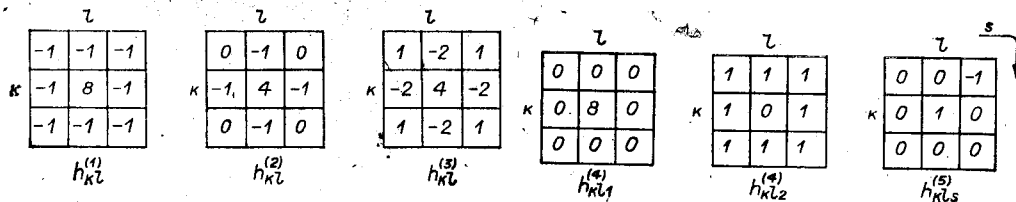


Рис. 4.

Рис. 5.

$g_{ij}^{(5)}$ — одновременно и к аддитивным, и к мультипликативным помехам. Причем если системы вторичных признаков $g_{ij}^{(1)} - g_{ij}^{(4)}$ получены на основе сравнения каждого элемента матрицы g_{ij} с математическим ожиданием его ближайшей окрестности, то преобразование (6) основано на оценке дисперсии окрестности относительно центрального элемента при всех взаимных положениях матриц $h_{kls}^{(5)}$ и g_{ij} . Кроме этих преобразований, использовались в работе операторы Собела и Уоллиса [4].

Обработка полученных ранее корреляционных функций проводилась в микроЭВМ после считывания и сжатия информации на выходе ГКИ. Программно были реализованы преобразования (4) — (6), а также операторы Собела и Уоллиса. Наибольшее увеличение отношения автокорреляционных и кросс-корреляционных отсчетов достигалось в системах вторичных признаков $g_{ij}^{(1)}, g_{ij}^{(4)}, g_{ij}^{(5)}$, что являлось следствием изотропности обработки и наличия большого центрального пика в соответствующих импульсных откликах.

Таким образом, с помощью созданного оптико-электронного процессора реализовано оперативное распознавание деталей промышленного производства, отличающихся ракурсами. При этом в качестве функций сходства использованы корреляционные функции оконтурированных обрабатываемых и контурных эталонных изображений. Показано, что за счет дополнительной цифровой обработки на выходе голографического коррелятора интенсивности удалось повысить отношение автокорреляционных и кросс-корреляционных отсчетов в 2—5 раз. Кроме того, экспериментально определены наиболее оптимальные с точки зрения повышения достоверности распознавания алгоритмы такой обработки.

Авторы выражают свою признательность Е. С. Нежевенко за полезные замечания при выполнении работы и чтении рукописи, Л. А. Гибной за участие в экспериментальных исследованиях, М. А. Гофману за разработку математического обеспечения системы управления процессором и Е. Н. Богомолу, без благожелательной помощи которого не был бы получен ряд экспериментальных результатов. Авторы также благодарны П. М. Шипову и В. И. Фельдбушу за предоставление образца фотоэлектрооптического модулятора света типа ПРИЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гибина Л. А., Нежевенко Е. С., Опарин А. Н., Потатуркин О. И. Оптико-электронная система с оперативным вводом и предварительной обработкой распознаваемых изображений. — Автометрия, 1984, № 2.
2. Опарин А. Н., Потатуркин О. И., Фельдбуш В. И., Шипов П. М. Голографический коррелятор интенсивности с фотоэлектрооптическим управляемым транспарантом ПРИЗ. — Автометрия, 1984, № 3.
3. Гофман М. А., Козик В. И., Потатуркин О. И., Фельдбуш В. И. Распознавание изображений в гибридной оптико-электронной системе с оперативным вводом. — В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений. Л.: Наука, 1982.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — М.: Мир, 1982, т. 2.

Поступила в редакцию 11 мая 1985 г.