

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 535.317.2 : 681.332

Л. А. ГИБИНА, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, А. Н. ОПАРИН,
О. И. ПОТАТУРКИН

(Новосибирск)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА С ОПЕРАТИВНЫМ ВВОДОМ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ РАСПОЗНАВАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Решение задачи распознавания изображений заданной конфигурации сводится к вычислению максимальной меры сходства между распознаваемым изображением (РИ) и эталоном при всевозможных значениях параметров геометрических преобразований (смещение, масштаб, ориентация и т. п.). Как правило, основным из них является смещение, поэтому для перебора по этому параметру при распознавании изображений целесообразно использовать корреляторы, позволяющие за счет свойства пространственной инвариантности реализовать параллельную обработку больших массивов данных. В то же время коэффициент корреляции как мера сходства, вычисляемая в корреляторах, оптимален, если множество РИ описывается сферико-симметричными распределениями вероятности [1]. Расширения класса решающих функций с целью повышения надежности распознавания можно добиться за счет осуществления предварительной обработки РИ [2, 3]. Следовательно, возникает необходимость создания корреляторов с функциями предобработки и оперативного ввода РИ, причем последнее особенно существенно при обработке реальных сцен. В данной работе рассмотрена оптико-электронная система распознавания изображений (ОЭС), в которой основным блоком является голографический коррелятор интенсивности (ГКИ) [4, 5], а предварительная обработка осуществляется на фотоэлектрооптическом управляемом транспаранте (УТ). Приводятся экспериментальные результаты по распознаванию тестовых изображений.

Метод распознавания. Пусть $\tilde{f}(r)$ — распределение интенсивности света в распознаваемой сцене, r — двумерные пространственные координаты, $h_k(r, l)$ — эталонное изображение (ЭИ), l — параметры геометрических преобразований, k — номер класса ЭИ. Задача распознавания в параллельном варианте сводится к определению k , при котором значения функции сходства $g(\tilde{f}(r), h_k(r, l))$ превышают пороговые, причем при формировании такой функции используются нормированные коэффициенты корреляций РИ и ЭИ. Для повышения надежности распознавания целесообразно осуществлять предобработку РИ (нелинейные преобразования, высокочастотная фильтрация и т. п.). В этом случае в функции сходства следует заменить исходное РИ $\tilde{f}(r)$ на обработанное $f(r)$. Поскольку для большинства изображений наибольшей информативностью обладают контурные линии, особенно вдоль границ РИ, выделение их в качестве системы признаков бывает достаточным для решения многих практических задач [6—8]. Поэтому в качестве операции предобработки целесообразно выбирать какой-либо вариант оконтуривания, а в качестве меры сходства — функционал, характеризующий степень совпадения

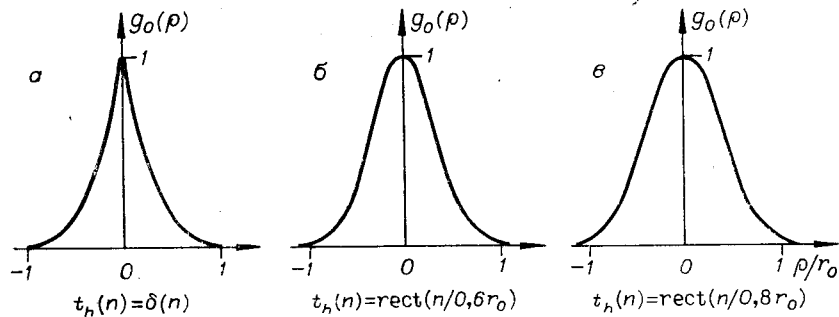


Рис. 1.

контуров РИ и ЭИ. При этом вид функции сходства зависит от формы сечения таких контуров по интенсивности.

Рассмотрим, каким образом можно вычислить в корреляторе указанную меру сходства. Пусть контур ЭИ ограничивает распределение $h_h(r, l)$, а контур РИ — $\tilde{f}(r)$. Аналогично [7] перейдем к системе координат (s, n) , связанной с контуром ЭИ так, что s направлено по касательной к контуру, а n — по нормали к нему. В этой системе координат контур ЭИ описывается выражением $n(s) = 0$, а контур РИ — $n(s) = \rho_{hl}(s)$. Очевидно, что если контуры бесконечно тонкие, т. е. их сечения по нормали $t_f(n)$ и $t_h(n)$ имеют вид $\delta(n)$, то при полном совпадении коэффициент корреляции равен длине контура, а при малейшем несовпадении по n вдоль всего контура обращается в 0. Рассмотрим случай, когда ширина контуров РИ и ЭИ конечна и равна ε , т. е. $t_f(n) = t_h(n) = \text{rect } n/\varepsilon$. Можно показать, что в этом случае в корреляторе вычисляется функция сходства

$$g(f, h) = \int_S \int_{-\infty}^{\infty} t_f(n) t_h(n - \rho(s)) dn ds = \int_S g_0(\rho(s)) ds = \int_S [\varepsilon - |\rho(s)|] \text{rect}(\rho(s)/2\varepsilon) ds, \quad (1)$$

где $g_0(\rho)$ — корреляционная функция сечений контуров РИ и ЭИ. Очевидно, что выражение (1) удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к функции сходства.

Наиболее распространен, однако, случай, когда РИ является силуэтным (к такому варианту, например, сводится большинство задач распознавания зрительных образов в робототехнике). При этом, как уже отмечалось выше, возникает необходимость в предобработке РИ, в результате чего сечение контура $t_f(n)$ отлично от прямоугольного и зависит от метода и средств обработки. Поскольку в этом случае целесообразно выполнять операцию оконтуривания на фотоэлектрооптических УТ, рассмотрим именно такой вариант. Реализуя согласно [9] метод «нерезкой маски», получаем при соответствующих режимах работы УТ сечение контура по интенсивности, представленное на рис. 1, а. Такое сечение хорошо аппроксимируется функцией

$$t_f(n) = [1,05 \exp(-3|n|/r_0) - 0,05] \text{rect}(n/2r_0), \quad (2)$$

r_0 — радиус импульсного отклика расфокусировки. В результате корреляции контуров (2) и ЭИ получаем аналогично (1) функцию сходства

$$g(f, h) = \int_S \int_{-\infty}^{\infty} [1,05 \exp(-\frac{3|n|}{r_0}) - 0,05] t_h\left(\frac{n - \rho(s)}{r_0}\right) \text{rect} \frac{n}{2r_0} dn ds.$$

Из этого выражения можно определить функцию $g_0(\rho)$ в зависимости от конкретного вида сечения ЭИ. Так, для $t_h(n) = \delta(n)$ (бесконечно тонкий контур) $g_0(\rho)$ равна $t_f(n)$ (см. рис. 1, а), откуда следует, что решающая функция в этом случае излишне критична к малейшим отклонениям ЭИ от РИ. При $t_h(n) = \text{rect}(n/ar_0)$ такая критичность уменьшается (см. рис. 1,

б, в) в зависимости от величины a . Следовательно, за счет выбора параметра расфокусировки r_0 и вида контура ЭИ можно расширить класс решающих функций, вычисляемых в корреляторах.

Оптический процессор. В соответствии с рассмотренным выше алгоритмом распознавания ОЭС состоит из устройства оперативного ввода РИ в ОЭС и их предварительной обработки, оптического коррелятора со сменными фильтрами, блоков электронной обработки и управления ОЭС. Целью работы являются описание и экспериментальное исследование только оптического процессора.

В последнее время наибольшее распространение в качестве устройства оперативного ввода РИ получили фотоэлектрооптические УТ различных типов. Первоначально они разрабатывались лишь как устройства ввода некогерентных изображений в когерентно-оптические системы. Однако впоследствии выяснилось, что УТ, особенно основанные на принципах электрооптики, одновременно являются и средством обработки изображений [10—13]. Таким образом, возникла возможность реализации целого ряда оперативных преобразований над изображениями.

В рассматриваемом оптическом процессоре для оперативного ввода и предварительной обработки РИ в ОЭС выбран УТ «Кристалл» (типа «Фототитус») [14]. При этом учитывались такие технические характеристики, как число регистрируемых элементов разрешения, контраст, однородность по полю. Предварительная обработка РИ осуществлялась с помощью одного из видов высокочастотной фильтрации — оконтуривания изображений. Принцип такого оконтуривания на фотоэлектрооптических УТ заключается в проецировании на фоточувствительный слой модулятора последовательно двух изображений, представляющих корреляционную функцию РИ с различными импульсными откликами. Причем режим работы УТ выбран так, чтобы при считывании формировалась разность этих изображений. В [9] рассмотрены различные режимы вычитания сфокусированного и расфокусированного изображений, что аналогично фотографической обработке согласно [15]. Так, при вычитании расфокусированного изображения из сфокусированного при закорачивании контактов на кристалле и фотослое получается асимметричный контур, сечение которого равно 0 для $n < 0$ и описывается выражением (2) для $n \geq 0$. Аналогично при перемене порядка экспонирования сечение полученного контура имеет вид (2) для $n \leq 0$ и обращается в 0 при $n > 0$. Что касается вычитания с заменой полярности питающего напряжения, то полученный симметричный контур полностью описывается выражением (2), имеет общую ширину, равную удвоенному параметру дефокусировки, и центр на границе исходного изображения.

Преобразованное таким образом РИ поступает на вход оптического коррелятора. Традиционно подобные системы выполнялись в виде классических амплитудных голографических корреляторов Вандер Люгта со всевозможными модификациями. Однако из-за невысоких, главным образом эксплуатационных, характеристик когерентных устройств в рассматриваемой ОЭС использован ГКИ, основанный на применении полностью когерентного излучения с усреднением результирующего светового распределения в выходной плоскости [16, 17]. Такие системы обладают преимуществами (с точки зрения коэффициента использования светового потока, отношения сигнал/шум и разрешения обрабатываемых РИ) по сравнению не только с амплитудными голографическими корреляторами, но и с ГКИ других типов.

Рассмотрим принцип действия ГКИ, схема которого приведена на рис. 2. Верхние обозначения относятся к процессу фильтрации, а нижние — к процессу съемки голограмм. При получении фильтров амплитудный импульсный отклик системы, представляющий собой ЭИ каждого класса, модулируется случайной фазовой маской (СФМ) $e^{j\varphi(r_1)}$ и регистрируется в виде голограммы Фурье. Передаточная функция, таким образом, равна

$$H_{\Phi}(w) = \mathcal{F}[h_{\Phi}(r_1)] = \mathcal{F}[h(r_1)e^{j\varphi(r_1)}], \quad (3)$$

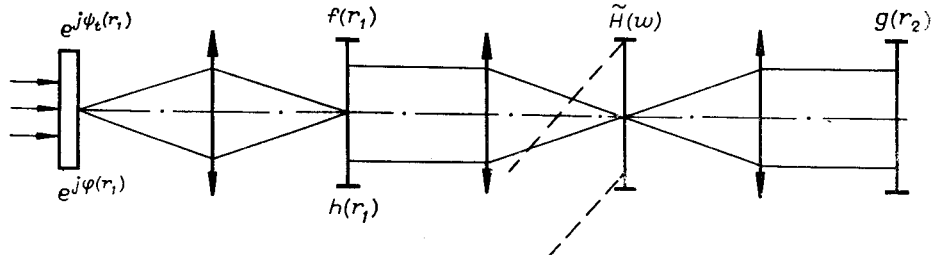


Рис. 2.

где w — двумерные координаты пространственной частоты. Без ограничения общности в данном изложении опущен индекс класса ЭИ.

В процессе фильтрации анализируемое амплитудное распределение, представляющее собой РИ, модулируется переменной во времени фазой $e^{j\psi_t(r_1)}$, фильтруется, а затем квадратируется и усредняется во времени в корреляционной плоскости. С учетом (3) получаем согласно [17]

$$g(r_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\varphi}(r_2, r_1) g_{\varphi}^*(r_2, r_1') \gamma(r_1 - r_1') dr_1' dr_1. \quad (4)$$

Здесь $g_{\varphi}(r_2, r_1) = f(r_1) h_{\varphi}(r_2 + r_1)$, $\gamma(r_1 - r_1') = \langle e^{j[\psi_t(r_1) - \psi_t(r_1')]} \rangle$.

В ГКИ рассматриваемого типа $\psi_t(r) = (2\pi r/\lambda) \operatorname{tg} \alpha(t) = w(t)r$, т. е. РИ в произвольный момент времени t освещается однородным световым пучком, отклоненным дефлектором на угол $\alpha(t)$. Следовательно,

$$\begin{aligned} \gamma(r_1 - r_1') &= \langle e^{jw(t)(r_1 - r_1')} \rangle = \mathcal{F} \left[\langle \mathcal{F}^{-1} [e^{jw(t)(r_1 - r_1')}] \rangle \right] = \\ &= \mathcal{F} [\langle \delta(w - w(t)) \rangle] \Big|_{r_1 - r_1'} = \mathcal{F} [S(w)] \Big|_{r_1 - r_1'}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $S(w)$ — траектория, которую за время цикла дефлектора описывает в плоскости фильтра световое распределение, пропорциональное спектру Фурье РИ. Таким образом, $\gamma(r)$, являющаяся обычно функцией частичной пространственной когерентности, в данном случае представляет собой преобразование Фурье от этой траектории.

В случае, когда $\gamma(r_1 - r_1') = \gamma_0 \delta(r_1 - r_1')$, получаем из (4) $g_{nc}(r_2) = |f(r_2)|^2 * |h(r_2)|^2$, т. е. корреляционную функцию РИ и ЭИ по интенсивности. Физически это выполняется, если дефлектор непрерывно заштриховывает всю бесконечную плоскость, однако такой случай практически не реализуем. Поэтому для сохранения изотропности обработки из нескольких приемлемых режимов работы выбираем наиболее просто реализуемый режим с круговой разверткой $w(t) = (2\pi/\lambda) \operatorname{tg} \alpha = w_0$. Тогда из (5) получаем

$$\gamma(r_1 - r_1') = \mathcal{F} [\delta(w - w_0)] \Big|_{r_1 - r_1'} = w_0 J_0 [w_0 (r_1 - r_1')]. \quad (6)$$

В этом случае $\gamma(r)$ имеет ширину центрального пика $\delta_0 \sim 1/w_0$, как правило, много меньше линейной апертуры системы в плоскости изображений l_0 . Тем не менее она отлична от δ -функции, поэтому световое распределение в корреляционной плоскости состоит из информативного некогерентного и шумящего когерентного сигналов.

Анализ погрешности, обусловленной такой когерентной добавкой, проведен в [18], где отношение сигнал/шум SNR определено для двух предельных соотношений между δ_0 и размером элемента СФМ δ_1 , применяемой при регистрации голографических фильтров ($\delta_0 \sim \delta_1$, $\delta_0 \gg \delta_1$). Полученные для обоих приближений значения SNR (при условии $l_0 \gg \delta_0$, что, как видно из (6), практически всегда выполнимо) близки друг другу и равны $\sim l_0/\delta_0$.

Поскольку ГКИ основаны на принципах дифракционной оптики, на точность вычислений влияет ширина спектральной линии излучения $\Delta\lambda$. Ограничение на ширину спектральной линии излучения имеет вид $\Delta\lambda < < d_1 d_0 / f$, откуда получаем

$$\lambda / \Delta\lambda > \lambda f / d_1 d_0 = D_1 / d_0 \sim l_0 / d_0, \quad (7)$$

где d_1 — шаг голографической решетки, f — фокусное расстояние объективов Фурье, D_1 — расстояние между нулевым и первым дифракционными порядками, d_0 — элемент разрешения РИ и ЭИ. Таким образом, отношение длины волны излучения к ширине ее спектральной линии должно превышать число обрабатываемых элементов разрешения РИ и ЭИ.

При обработке в ГКИ происходит уменьшение разрешения корреляционной функции по сравнению с разрешением РИ и ЭИ, что обусловлено влиянием конечного радиуса вращения w_0 спектра РИ и конечного размера элемента разрешения СФМ δ_1 . Это приводит к уменьшению эффективной апертуры голограммы $1/d_0$, и размер элемента разрешения корреляционной функции становится равным

$$\Delta = d_0 + \delta_0 + \delta_1. \quad (8)$$

Для эффективной работы ГКИ необходимо выбирать $\delta_0 \sim d_0$ и $\delta_1 < \delta_0$, d_0 , вследствие чего размером δ_1 в выражении (8) можно пренебречь.

Кроме того, как показано в [19], ГКИ свойственны существенно меньшие требования к точности юстировок отдельных узлов и элементов по сравнению с амплитудными голографическими корреляторами. В случае линейной по интенсивности обработки изображений наблюдается инвариантность оптических вычислений к продольному (относительно оптической оси) сдвигу голографического фильтра, а также при соответствующей подстройке выходной плоскости инвариантность к продольному сдвигу входной плоскости и объектива обратного преобразования Фурье. Без выполнения такой подстройки в ГКИ осуществляется корреляция ЭИ и расфокусированного РИ. Аналогичную операцию необходимо выполнять и при продольном сдвиге объектива прямого преобразования Фурье, однако при этом полной инвариантности добиться не удастся, поскольку РИ меняет масштаб относительно ЭИ. Что касается поперечных сдвигов РИ и объективов преобразований Фурье, то они приводят к сдвигу системы координат (в пределах пространственной инвариантности), а влияние поперечных смещений голографического фильтра (в пределах его апертуры) отсутствует из-за его избыточной регистрации с СФМ.

Таким образом, ГКИ, сохраняя в основном большинство положительных свойств амплитудных голографических корреляторов, обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ, которые особенно существенны при практической реализации оптических методов обработки изображений.

Экспериментальные результаты. Согласно изложенным выше принципам оптической обработки, была создана оптико-электронная система распознавания изображений с оперативным вводом и предварительной обработкой РИ.

Схема ОЭС приведена на рис. 3, где 1 — осветитель со светофильтром; 2 — двухкоординатный перемещающийся столик; 3, 4 — объективы телескопической системы; 5 — интерферометр; 6 — фотоэлектрооптический УТ; 7 — лазер; 8 — микрообъектив с диафрагмой; 9 — проекционный объектив; 10 — вращающееся зеркало; 11 — поляризатор; 12 — зеркальная призма; 13 — фурье-объектив; 14 — анализатор; 15 — проекционный объектив; 16 — зеркало; 17 — блок со сменными голографическими фильтрами; 18 — фурье-объектив; 19 — фотосчитывающее устройство; 20 — блок электронной обработки и управления ОЭС.

Плоскость столика 2, на котором устанавливается на необходимой позиции фотоснимок с исходным изображением, проецируется телескопической системой из объективов 3, 4 в плоскость фотослоя УТ 6 по одному

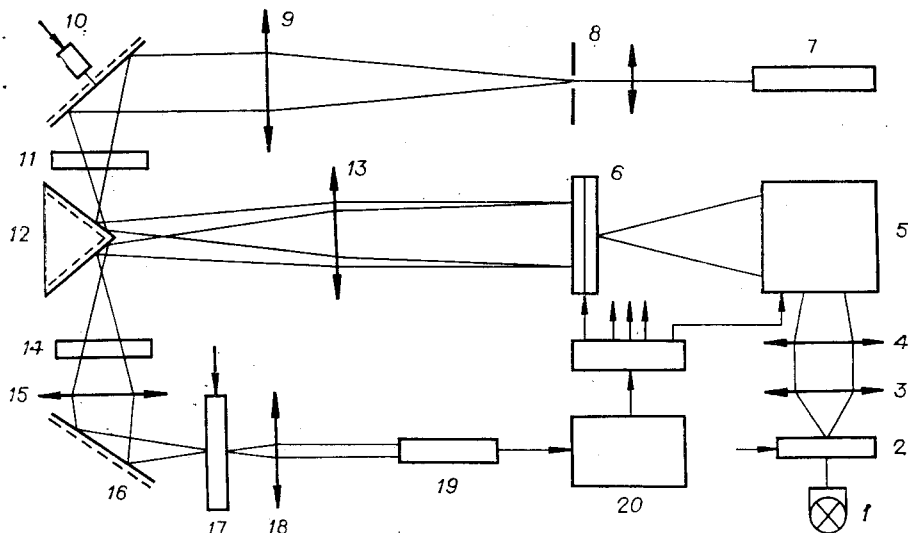


Рис. 3.

каналу интерферометра. В другом канале осуществляется расфокусировка исходного изображения с регулируемым параметром. Блок 5 выполнен по схеме интерферометра Майкельсона с затворами в каждом канале, которые работают в раздельном режиме. Таким образом, на УТ 6 за две экспозиции выполняется оконтуривание исходного изображения, а за одну экспозицию — его оперативный ввод в ОЭС. Объективы 9, 15 осуществляют проецирование соответственно точечного источника и светового распределения, пропорционального пространственному спектру Фурье РИ. Объектив 13 служит для формирования плоской световой волны (на прямом проходе) и для выполнения преобразования Фурье (на обратном проходе), а объектив 18 — для выполнения обратного преобразования Фурье. Вращающееся зеркало 10 формирует в плоскости голографического фильтра 17 световую траекторию спектра Фурье РИ в виде окружности.

В корреляторе использованы: 3, 4 — объективы Ю36Б ($f = 250$ мм, 1:3,5); 6 — УТ «Кристалл» (разрешение 30 лин./мм, контраст при этом разрешении 40:1, чувствительность при указанном контрасте 10^{-5} Дж/см² на длине волны 400 нм); 7 — лазер ЛГ-79-1 (мощность 18 мВт); микрообъектив 8 — 8^x; 9, 15 — объективы Ю-6-2 ($f = 180$ мм, 1:2, 8); 13 — объектив О-2 ($f = 600$ мм, 1:10); 18 — объектив «Тессар» ($f = 150$ мм, 1:4,5); стандартные светофильтры.

В качестве РИ в работе были выбраны тестовые изображения 8 классов. Определению подлежали РИ двух классов ($k = 1$ и $k = 2$), вид ЭИ ($h_1(r, l)$ и $h_2(r, l)$) которых приведен соответственно на рис. 4, а, б. Исходное изображение $f(r)$ (или $f(r)$) представляло собой 8 пар РИ (по числу классов), заданных соответственно в силуэтном или контурном виде (рис. 5, а, б).

Первоначально процесс распознавания был реализован собственно в ГКИ, т. е. ввод РИ осуществлялся с фотопленки, минуя УТ. Для этого в процессоре с помощью откидного зеркала и зеркального экрана была сформирована плоскость, проективно сопряженная с входной плоскостью

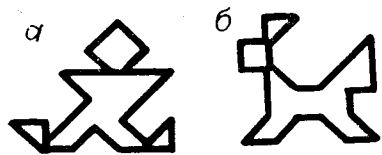


Рис. 4.

ОЭС. В нее помещалось исходное контурное изображение на фотопленке, а результаты корреляций ЭИ и РИ выводились на монитор и телевизионный осциллограф, причем значения порогов c_1 , c_2 задавались электронным способом. На рис. 6, а приведено световое распределение с экрана монитора, пропорциональ-

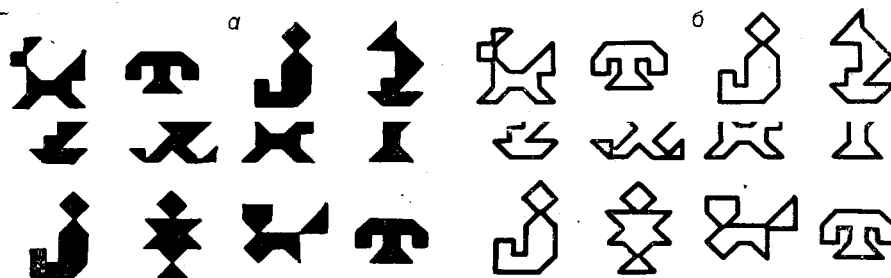


Рис. 5.

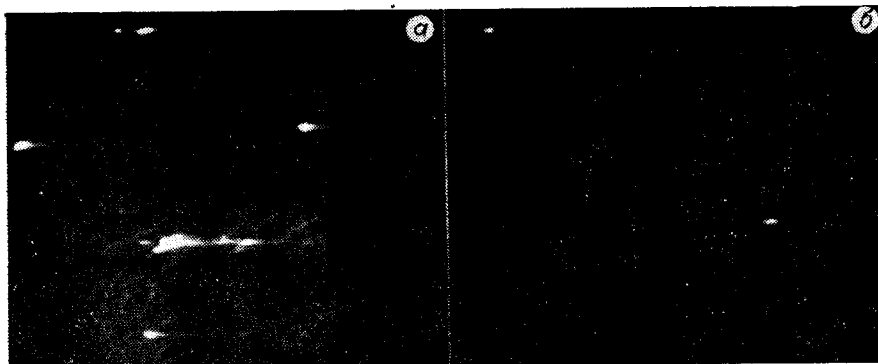


Рис. 6.

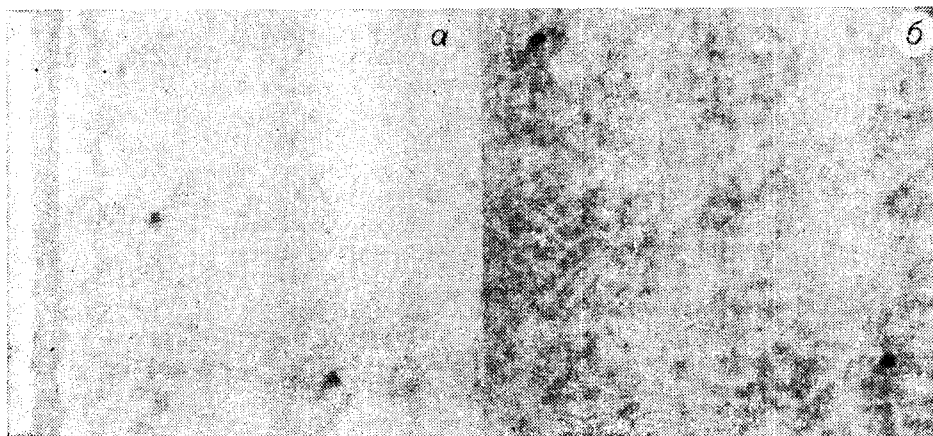


Рис. 7.

ное $g_1(l) - c_1$ при небольшом значении c_1 , на котором, несмотря на справедливость неравенства $g_1(l) > g_2(l), \dots, g_s(l)$, опознаются изображения не только первого класса.

Повышая значения порога, можно оставить лишь надпороговые значения автокорреляционной функции, подавив при этом все значения кросс-корреляционных функций. На рис. 6, б, где c_2 выбрано именно

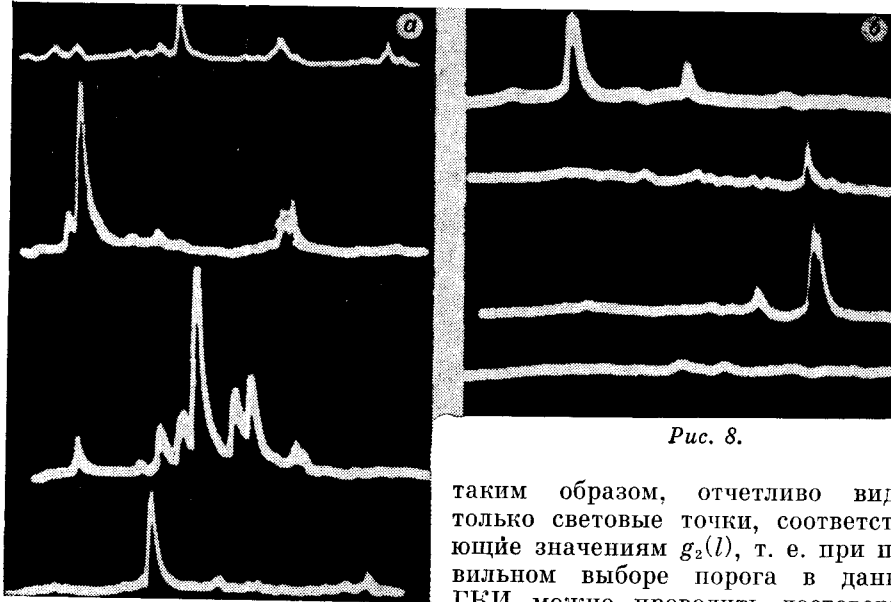


Рис. 8.

таким образом, отчетливо видны только световые точки, соответствующие значениям $g_2(l)$, т. е. при правильном выборе порога в данном ГКИ можно проводить достоверное распознавание тестовых изображений, заданных на фотоленке. Вид светового распределения в корреляционной плоскости для $g_1(l)$ и $g_2(l)$ (негатив) приведен соответственно на рис. 7, а, б, а результат его сканирования вдоль четырех строк через центры РИ — на рис. 8, а, б.

В последующих экспериментах РИ вводились в ОЭС оперативно с помощью УТ. Сечения выходного светового распределения через условные центры РИ, пропорционального $g_1(l)$ и $g_2(l)$, приведены на рис. 9, а, б. Видно, что отношение коэффициентов автокорреляции и кросс-корреляции в этом случае практически не уменьшается по сравнению с результатами, полученными при вводе РИ в ОЭС с фотоленки.

Отметим, что в этих экспериментах РИ задавались в контурном виде, поскольку экспериментальные корреляционные функции $\tilde{g}_1(l)$, $\tilde{g}_2(l)$ не обеспечивали достоверного распознавания. Поэтому при распознавании силуэтных РИ осуществлялась их предварительная обработка (оконтуривание). Сечения корреляционных функций $g_1(l)$, $g_2(l)$ для этого случая приведены на рис. 10, а, б. Из сравнения осциллограмм на рис. 8—10 следует, что выполнение операции оконтуривания одновременно с оперативным вводом силуэтных РИ позволяет осуществить их достоверное распознавание, хотя динамический диапазон корреляционных функций уменьшается по сравнению с результатом корреляции контурных РИ и ЭИ. Такое уменьшение является следствием невысокого (относительно внешнего фона) контраста полученных контуров, что характерно для метода «нерезкой маски» из-за отсутствия нелинейной обработки.

Заключение. Таким образом, для целей распознавания изображений целесообразно применять оптико-электронные системы на основе голографических корреляторов интенсивности, с одной стороны, обеспечивающих многоканальную и параллельную обработки с высоким разрешением, а с другой — обладающих низкими требованиями к точности юстировок отдельных блоков и узлов ОЭС, высоким отношением сигнал/шум, отсутствием чувствительности к фазовым искажениям. При этом наиболее существенный недостаток таких систем — отсутствие знакопеременного импульсного отклика — устраняется при применении в качестве устройств ввода фотоэлектрооптических УТ с функциями предварительной обработки.

Проведенные экспериментальные исследования показали повторяемость результатов и хорошую работоспособность оптического процессора

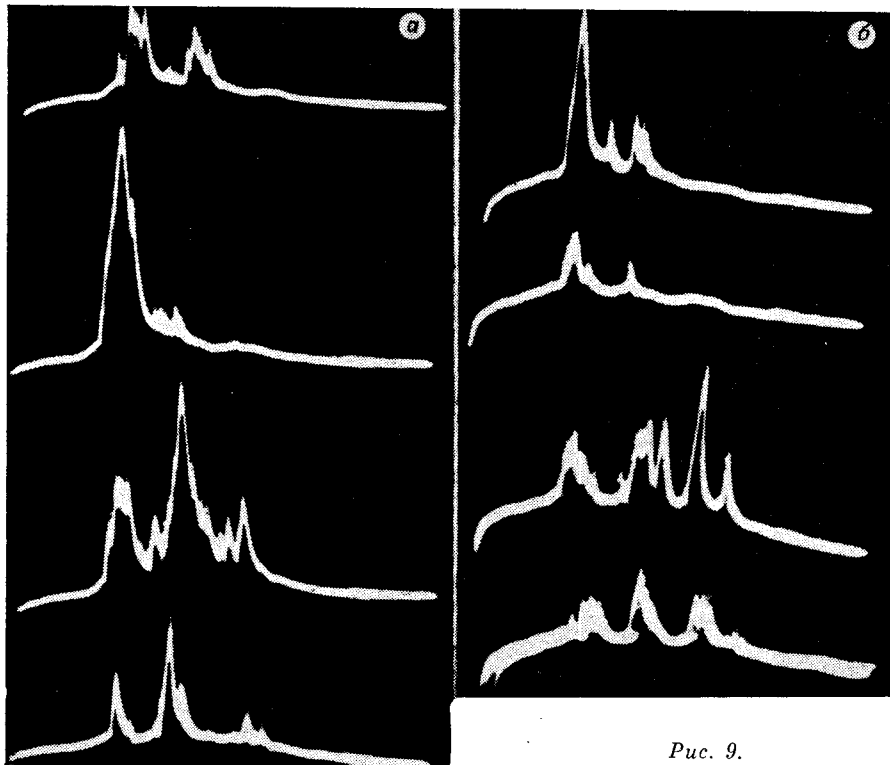


Рис. 9.

как при неоперативном (с фотопленки) или оперативном (с УТ) вводе контурных РИ в ОЭС, так и при одновременном оперативном вводе и предварительной обработке силуэтных РИ. Однако в последнем случае существенно снижается динамический диапазон значений корреляционных функций, что обусловлено невысоким контрастом полученных контуров. Поэтому, при одновременном вводе и предобработке РИ необходимо либо повысить нелинейность УТ, либо вести дополнительную нелинейную обработку.

Авторы выражают свою признательность М. А. Гофману за участие в разработке оптико-электронной системы, а также Л. С. Низамову и

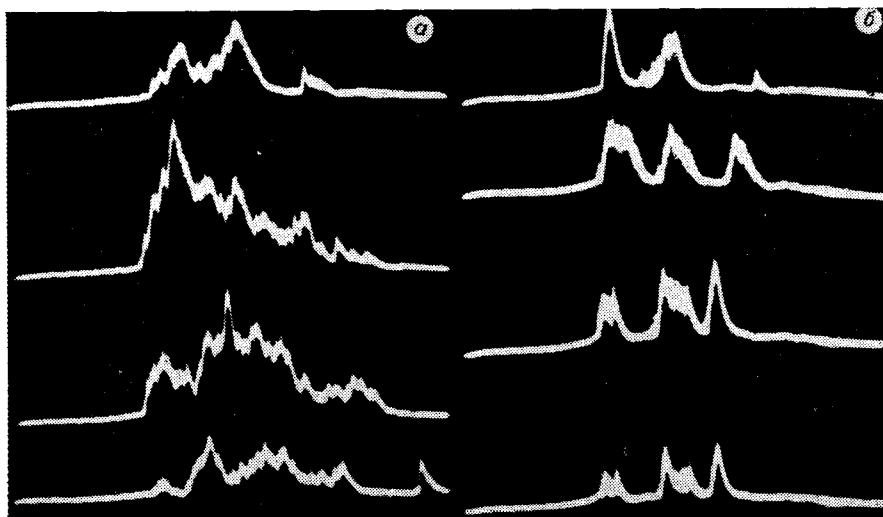


Рис. 10.

А. П. Шамову за помощь при создании ОЭС. Авторы также благодарны А. З. Дуну, С. Ю. Меркину и Г. П. Щербакову за предоставление образца фотоэлектрооптического модулятора света «Кристалл» и консультации по его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалевский В. А. Методы оптимальных решений в распознавании изображений.— М.: Наука, 1976.
2. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов.— М.: Сов. радио, 1977.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982, т. 2.
4. Lohmann A. W. Matched filtering with self-luminous objects.— Appl. Opt., 1968, vol. 7, p. 561.
5. Potaturkin O. I. Incoherent diffraction correlator with a holographic filter.— Appl. Opt., 1979, vol. 18, p. 4203.
6. Карпова О. М., Нежевенко Е. С., Уманцев Г. Д. Распознавание изображений известной формы на фотоснимках.— Автометрия, 1975, № 3.
7. Козлов О. А., Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И. Распознавание изображений в когерентно-оптических системах с применением контурных эталонов.— Автометрия, 1976, № 6.
8. Давыдов В. Т., Потатуркин О. И. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания изображений.— Автометрия, 1979, № 4.
9. Дун А. З. и др. Исследование фотоэлектрооптического модулятора света в режиме обработки изображений.— Автометрия, 1982, № 2.
10. Нежевенко Е. С. Новый подход к оптической аналоговой вычислительной технике.— В кн.: Оптическая обработка информации. Л.: ЛИЯФ, 1979.
11. Котляр П. Е., Нежевенко Е. С., Опарин А. Н., Фельдбуш В. И. Дифференциальные управляемые транспаранты для обработки оптической информации.— Там же.
12. Петров М. П., Хоменко А. В., Марахонов В. И., Шлягин М. Г. Нестационарные явления в пространственно-временном модуляторе света.— Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, вып. 7.
13. Фельдбуш В. И. Управляемый транспарант для оконтуривания изображений.— Автометрия, 1980, № 6.
14. Дун А. З. и др. Фотоэлектрооптический преобразователь на основе охлаждаемого кристалла KD_2PO_4 и селенового фотослоя.— Электрон. техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, 1978, вып. 7.
15. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации.— М.: Мир, 1978.
16. Chavel P., Lowenthal S. A method of incoherent optical-image processing using synthetic holograms.— JOSA, 1976, vol. 66, p. 14.
17. Potaturkin O. I., Nezhevenko E. S., Khotzkin V. I. Coherent intensity correlator.— J. Opt., 1980, vol. 11, p. 305.
18. Потатуркин О. И. Дифракционные корреляторы интенсивности.— В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980.
19. Potaturkin O. I., Khotzkin V. I. Diffraction correlators invariant to the shift of optical elements.— Opt. Comm., 1980, vol. 34, p. 159.

*Поступила в редакцию 3 июля 1983 г.;
окончательный вариант — 20 сентября 1983 г.*

УДК 681.7 : 535.316

Т. М. БАНДМАН
(Новосибирск)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ И АБЕРРАЦИЙ ЛИНЗЫ ПО ИЗВЕСТНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ

В статье решается следующая обратная задача. Известно изображение тестовых сигналов, формируемое тонкой неидеальной линзой, и расстояние от плоскости источников до плоскости изображений. По этим данным восстанавливаются характеристики линзы (ее фокусное расстояние и aberrации) и расстояние от нее до плоскости изображения. Под aberrациями подразумеваются фазовые неоднородности, которые могут