

16. Смит Ф. Г. Пульсары: Пер. с англ.— М.: Мир, 1979.
 17. Выжлов Б. В., Иванова В. В., Извекова В. А. и др. Автоматизация обработки наблюдений пульсаров // Техника и методы радиоастрономического приема/Тр. ФИАН.— М.: Наука, 1977.— Т. 93.
 18. Cole T. W. Radio observation with a wide fractional band — width // Proc. Astronom. Soc. Australia.— 1979.— V. 5, N 3.— P. 330.

Поступила в редакцию 1 ноября 1985 г.

УДК 681.7.013.82

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

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯТОРА, СОПРЯЖЕННОГО С ВИДЕОПРОЦЕССОРОМ

Голографические корреляторы интенсивности (ГКИ) с квазимонохроматической ЭЛТ и вводом обрабатываемой информации из телевизионного канала могут успешно использоваться в оптико-электронных системах (ОЭС) распознавания изображений в качестве блока оптической обработки [1—4]. Однако включение в схему коррелятора квазимонохроматической ЭЛТ накладывает свои ограничения на его пропускную способность (число разрешимых элементов), поэтому становится актуальным вопрос исследования характеристик ГКИ в зависимости от параметров ЭЛТ. Кроме того, для эффективного распознавания целесообразно проводить предобработку локальными операторами, которые в отличие от интегральных реализуются без снижения быстродействия аппаратными электронными средствами. В этом случае становится существенным вопрос выбора алгоритма предобработки (который должен быть «заяян» в соответствующий процессор) на основе оценки дискриминантных свойств корреляционных функций, полученных в конкретной ОЭС с учетом метрологии коррелятора. Цель работы заключается: в создании ОЭС, состоящей из ГКИ с квазимонохроматической ЭЛТ и сопряженного с ним по входу и выходу универсального видеопроцессора [5], управляемого от микроЭВМ; в исследовании влияния параметров оптической системы ГКИ и квазимонохроматической ЭЛТ на разрешение коррелятора; в оценке эффективности распознавания реальных объектов при различных алгоритмах предобработки.

Рассмотрим принцип работы ОЭС, схема которой приведена на рис. 1. Изображения распознаваемых объектов с помощью ТВ-камеры 1 вводятся в видеопроцессор 2. Структура видеопроцессора и принцип действия изложены в [5, 6], поэтому в данной работе ограничимся кратким описанием его функциональных возможностей.

Расознаваемые изображения (РИ) через АЦП и коммутатор регистрируются в телевизионном темпе в любом из двух «кубов» памяти (8 разрядов, 512×512 элементов). Над регистрируемыми и хранящи-

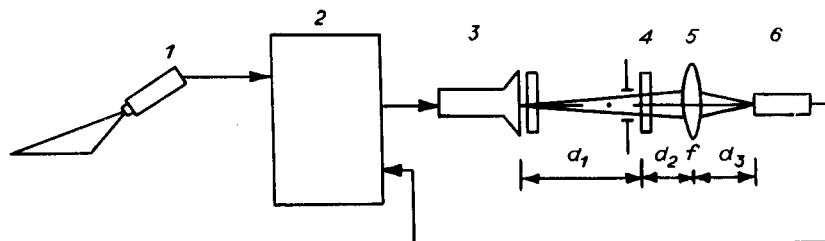


Рис. 1

мися в памяти изображениями могут быть произведены логические и алгебраические преобразования посредством арифметико-логического устройства (АЛУ) и блока нелинейных преобразований интенсивности (НИИ). Кроме того, существует блок, выполняющий параллельный сдвиг всей информации в одном из «кубов» памяти в вертикальном и горизонтальном направлениях за время телевизионного кадра. Коммутатор, АЛУ, блок НИИ и блок сдвигов программно управляются от микроЭВМ. Таким образом, в видеопроцессоре поточечные и локальные операции предобработки (увеличение и выравнивание контраста, оконтуривание различными операторами и т. п.) могут выполняться за время нескольких телевизионных кадров, что позволяет использовать его как быстродействующее универсальное средство для моделирования процесса предобработки в рамках ОЭС.

Обработанные в видеопроцессоре изображения высвечиваются на экране квазимонохроматической ЭЛТ 3 во входной плоскости ГКИ. Перед экраном ЭЛТ помещаются светофильтры, предназначенные для режекции боковых спектральных линий излучения. Входная диафрагма, расположенная в одном блоке с голографическими фильтрами (ГФ) 4, выделяет нужную голограмму из матрицы ГФ. Данный блок может передвигаться вдоль оптической оси относительно неподвижных ЭЛТ и объектива 5, осуществляющего проективное сопряжение входной и выходной (мишень фотоприемного устройства (ФПУ) 6) плоскостей ГКИ, так что

$$1/(d_1 + d_2) + 1/d_3 = 1/f, \quad d_1 + d_2 = \text{const}, \quad (1)$$

где d_1 , d_2 , d_3 ясны из рис. 1, а f — фокус объектива 5, т. е. масштабный коэффициент преобразования входной плоскости ГКИ в выходную равен

$$n = d_3/(d_1 + d_2). \quad (2)$$

Согласно [7], эталонное изображение (ЭИ) $h(\cdot)$, восстановленное с голограммы точечным источником в плоскости ЭЛТ, проецируется объективом 5 в плоскость мишени ФПУ таким образом, что его координаты определяются координатами восстанавливаемой точки. Суммируя за время телевизионного кадра распределение интенсивности на мишени ФПУ по всем точкам обрабатываемого в ГКИ изображения (ОИ) $f(\cdot)$, полученного из РИ после применения локальных операторов предобработки, на выходе ГКИ имеем

$$g(x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} |f(mx_1)|^2 \left| h \left(\frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 d_1} \frac{1}{n} x_2 - \frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 d_1} x_1 \right) \right|^2 dx_1, \quad (3)$$

где x_1 и x_2 — одномерные (для упрощения записи) пространственные координаты соответственно в плоскостях экрана ЭЛТ и мишени ФПУ; λ_1 и λ_2 — длины волн излучения при регистрации голограмм и корреляции изображений; f_1 — фокусное расстояние объектива при регистрации голограмм; m — масштаб ОИ относительно ЭИ. Из (1), (2) видно, что в таком корреляторе с помощью продольного сдвига голографического фильтра можно аналогично [8] легко согласовать масштабы ОИ и ЭИ, причем в больших пределах и без подстройки оптической системы ГКИ. В этом случае зависимость масштабного коэффициента от параметров коррелятора и системы записи голограмм имеет вид

$$m = \lambda_1 f_1 / \lambda_2 d_1. \quad (4)$$

Полученная таким образом корреляционная функция с ФПУ 6 подается в видеопроцессор 2, где либо обрабатывается перед принятием решения о наличии искомого объекта, либо непосредственно выводится на ТВ-монитор и осциллограф с блоком выделения произвольной телевизионной строки.

Оценим влияние параметров квазимонохроматической ЭЛТ (разрешения, спектра излучения и апертуры) и других элементов оптической

системы на характеристики ГКИ (размер импульсного отклика и пропускную способность). Для оценки импульсного отклика определим ширину вертикальной и горизонтальной линий на выходе коррелятора, когда ОИ и ЭИ представляют собой взаимно параллельные линии соответствующих направлений. С учетом вертикальной пещущей решетки голографических фильтров выражения для ширины линий по обоим направлениям имеют вид

$$\begin{aligned}\Delta x_2 &= (\Delta x_1 + \Delta F/m + \Delta D)n + \Delta x_\lambda + \Delta p; \\ \Delta y_2 &= (\Delta y_1 + \Delta F/m + \Delta D)n + \Delta p,\end{aligned}\quad (5)$$

где Δx_2 и Δy_2 — ширина соответственно вертикальной и горизонтальной линий в выходной плоскости ГКИ, а Δx_1 и Δy_1 — во входной плоскости; ΔF — ширина соответствующей линии ЭИ; ΔD — уширение, обусловленное дифракционными ограничениями; Δx_λ — уширение за счет дисперсии света на решетке; Δp — величина, обратная разрешению объектива коррелятора.

Для оценки импульсного отклика ГКИ необходимо определить все составляющие в (5).

Размеры элементов разрешения ЭЛТ вдоль и поперек строки различны. Для учета этого фактора введем обозначения « \parallel », « \perp », где « \parallel » означает разрешение по направлению, параллельному развертке, а « \perp » — перпендикулярному. Таким образом, имеем

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= \Delta x_1^\parallel \text{ и } \Delta y_1 = \Delta y_1^\perp, \\ \Delta x_1 &= \Delta x_1^\perp \text{ и } \Delta y_1 = \Delta y_1^\parallel\end{aligned}$$

при горизонтальной и вертикальной развертках соответственно, т. е.

$$\Delta x_1^\parallel = \Delta y_1^\parallel \text{ и } \Delta x_1^\perp = \Delta y_1^\perp. \quad (6)$$

Для определения этих величин в видеопроцессоре программно формировался набор линий заданной пространственной частоты, которые далее высвечивались на экране ЭЛТ и наблюдались в микроскоп. Ширина импульсного отклика определялась по предельному разрешению при изменении пространственной частоты набора линий и оказалась равной соответственно вдоль и поперек развертки: $\Delta x_1^\parallel = 84$, $\Delta x_1^\perp = 134$ мкм.

На голографических фильтрах в качестве ЭИ регистрировались одиночные вертикальная и горизонтальная линии шириной $\Delta F = 100$ мкм. На экране ЭЛТ высвечивалась линия, параллельная ЭИ. В ГКИ было установлено: $n \approx 0,325$, $d_1 = f_1$, $\lambda_1 = 632,8$, $\lambda_2 = 544,5$ нм, поэтому из (3) $1/m = \lambda_2/\lambda_1 = 0,86$.

В параксимальной области объектива коррелятора $\Delta p \approx 17$ мкм. Дифракционное уширение на самой малой апертуре — апертуре голограммы, приведенное к плоскости экрана ЭЛТ, рассчитывалось согласно $\Delta D \approx 2,44\lambda_2 d_1/D$, где D — диаметр голограмм. Для $d_1 = 150$ мм, $D = 5$ мм получено $\Delta D \approx 40$ мкм.

Спектр излучения ЭЛТ был дискретным с основной двойной линией в зеленой области $\lambda_2 = 544,5$ нм и боковыми линиями в несколько раз меньшей интенсивности в синей — $\lambda_2^b = 491,3$ нм, зеленой — $\lambda_2^g = 549,2$ нм, оранжевой — $\lambda_2^o = 589,1$ нм, красной — $\lambda_2^r = 625$ нм. Кроме того, имелось несколько линий незначительной интенсивности в более далеких относительно зеленой областях спектра. Применение светофильтров позволило выделить в спектре излучения ЭЛТ двойную зеленую линию с $\lambda_2 = 544,5$ нм и шириной $\Delta\lambda_2 = 6,7$ нм, а интерференционный фильтр пропускал лишь одну линию с $\Delta\tilde{\lambda}_2 = 2,7$ нм. Теоретически оценить влияние дисперсии света на решетке голографического фильтра удобнее в плоскости экрана ЭЛТ с учетом последующего проектирования в выходную плоскость с масштабным коэффициентом n . Излучение ЭЛТ, дифрагированное на угол α , попадает соответственно

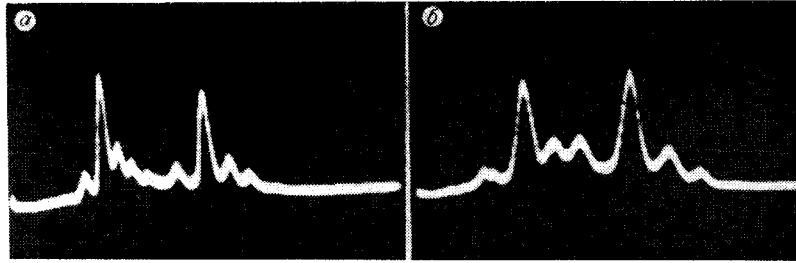


Рис. 2

во входной и выходной плоскостях ГКИ в точки с координатами $x_1 = d_1 \operatorname{tg} \alpha$, $x_2 = nd_1 \operatorname{tg} \alpha$. Поскольку угол дифракции связан с длиной волны и частотой решетки (ν) соотношением $\sin \alpha = \lambda \nu$, имеем

$$x_2 = nd_1 \lambda \nu / (1 - \lambda^2 \nu^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Отсюда легко найти зависимость изменения пространственной координаты в выходной плоскости ГКИ от изменения длины волны излучения ЭЛТ. Раскладывая (7) вблизи λ_2 по $\Delta \lambda \ll \lambda_2$ и ограничиваясь двумя членами ряда, получаем

$$\Delta x_\lambda \approx nd_1 \nu \Delta \lambda / (1 - \lambda^2 \nu^2)^{3/2}. \quad (8)$$

Справедливость оценки (8) была проверена экспериментально для различных значений несущей частоты ν . С целью уменьшения относительной погрешности измерений уширения Δx_λ определялись для достаточно больших $\Delta \lambda$: для длин волн λ_2^b и λ_2^o относительно λ_2 . На рис. 2, а, б приведены сканограммы выходного светового распределения вдоль горизонтальной координаты для пар частот: $\nu = 200, 300 \text{ мм}^{-1}$ и $\nu = 400, 500 \text{ мм}^{-1}$ соответственно. Здесь максимальный пик для каждой ν соответствует λ_2 , левый — λ_2^b , а правые — λ_2^o и λ_2^r . Для трех пар значений $\Delta \lambda (\lambda_2^b - \lambda_2, 0; 0, \lambda_2^o - \lambda_2; \lambda_2^b - \lambda_2, \lambda_2^o - \lambda_2)$ строились линейные аппроксимации зависимости Δx_λ от $\Delta \lambda$ и затем по этим прямым определялись уширения Δx_λ для малых изменений λ ($\Delta \lambda = \Delta \lambda_2$ — двойная зеленая линия излучения ЭЛТ). Теоретические и экспериментальные (для всех трех аппроксимаций), а также средние значения дисперсионного уширения при $\Delta \lambda = \Delta \lambda_2$ приведены в табл. 1. Из таблицы видно хорошее соответствие изложенных теоретической и экспериментальной методик определения зависимости уширения от $\Delta \lambda$ и ν для некогерентного коррелятора с голографическим фильтром и квазимохроматической ЭЛТ.

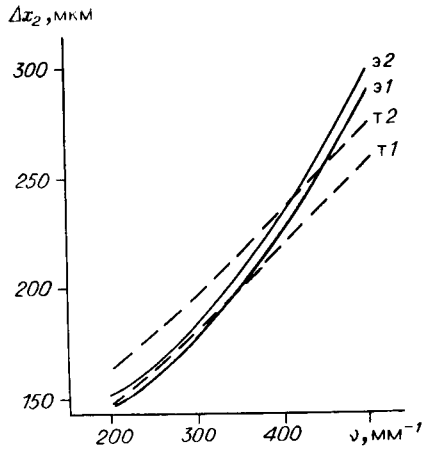
Таким образом, подставляя в (5) найденные значения всех составляющих, определим полную ширину корреляционной функции по обоим направлениям Δx_2 и Δy_2 , причем в первом случае для различных ν . На рис. 3 приведены теоретическая (пунктирные линии) и эксперимен-

Таблица 1

| $\nu, \text{мм}^{-1}$ | $\Delta x_\lambda^T, \text{мкм}$ | $\Delta x_\lambda^a, \text{мкм}$ | | | $\langle \Delta x_\lambda^a \rangle, \text{мкм}$ |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|--|
| 200 | 65 | 64,9 | 63 | 66,5 | 64,8 |
| 300 | 100 | 106,6 | 104 | 198,9 | 106,5 |
| 400 | 138 | 148,5 | 147,5 | 149,4 | 148,5 |
| 500 | 180 | 189,1 | 188,4 | 189,8 | 189,1 |

Таблица 2

| $\nu, \text{мм}^{-1}$ | $\Delta x_2^T, \text{мкм}$ | $\Delta x_2^{T \perp}, \text{мкм}$ |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 200 | 110 | 126 |
| 300 | 124 | 140 |
| 400 | 138 | 154 |
| 500 | 156 | 172 |
| 600 | 176 | 191 |



Т а б л и ц а 3

| $\nu, \text{мм}^{-1}$ | $c_1(\Delta\lambda_2)$ | $c_2(\Delta\lambda_2)$ | $c_1(\Delta\tilde{\lambda}_2)$ | $c_2(\Delta\tilde{\lambda}_2)$ |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 200 | 1,49 | 1,96 | 1,10 | 1,50 |
| 300 | 1,84 | 2,39 | 1,24 | 1,67 |
| 400 | 2,22 | 2,83 | 1,38 | 1,84 |
| 500 | 2,64 | 3,33 | 1,56 | 2,05 |
| 600 | 3,12 | 3,90 | 1,77 | 2,28 |

Рис. 3

таблица (сплошные линии) зависимости Δx_2 от ν при горизонтальной (индексы т1, э1) и вертикальной (индексы т2, э2) развертках ЭЛТ. Большее расстояние между кривыми т2 и т1 по сравнению с э2 и э1 обусловлено, по-видимому, погрешностью при определении разрешения ЭЛТ, связанной с дискретностью изменения периода тестовых решеток.

Превышение экспериментальных данных над теоретическими для $\nu > 400 \text{ мм}^{-1}$ объясняется тем, что для этих частот дифрагированный сигнальный пучок проходит под значительным углом вне параксиальной области объектива и потому Δr больше паспортных данных.

Применение в ГКИ интерференционных фильтров ($\Delta\lambda = \Delta\tilde{\lambda}_2$) приводит к сужению Δx_2 и, следовательно, к уменьшению Δx_2 . Теоретические значения Δx_2 для этого случая при различных ν и двух направлениях развертки ЭЛТ приведены в табл. 2. На основе этих данных можно оценить целесообразность использования интерференционных фильтров, при этом следует иметь в виду, что уменьшение $\Delta\lambda$ сопровождается более чем двукратной потерей полезной мощности излучения.

Для экспериментального определения Δy_2 в качестве ОИ и ЭИ использовались горизонтальные линии при горизонтальной и вертикальной развертках ЭЛТ и вертикальной несущей решетки голограмм. Поскольку в проводимых экспериментах определение характерных размеров корреляционных функций менее 100 мкм не могло быть выполнено с высокой точностью, измерение данных проводилось несколько раз с последующим усреднением. Полученные теоретические и экспериментальные значения равны (мкм):

$$\begin{aligned} \Delta y_2^{\text{т}\perp} &\simeq 99,7, & \langle \Delta y_2^{\text{э}\perp} \rangle &\simeq 102, \\ \Delta y_2^{\text{т}\parallel} &\simeq 83,8, & \langle \Delta y_2^{\text{э}\parallel} \rangle &\simeq 80. \end{aligned} \quad (9)$$

Следовательно, из значений (9), табл. 2 и графиков на рис. 3 можно определить разрешающую способность ГКИ в зависимости от направления развертки ЭЛТ, степени монохроматичности ее излучения, частоты решетки голографических фильтров и других параметров оптической системы, а также вычислить степень анизотропии корреляционных функций. Для характеристики степени анизотропии введем обозначения:

$$c_1(\Delta\lambda) = \Delta x_2^{\parallel} / \Delta y_2^{\perp}, \quad c_2(\Delta\lambda) = \Delta x_2^{\perp} / \Delta y_2^{\parallel} \quad (10)$$

соответственно для взаимно перпендикулярных и параллельных направлений развертки ЭЛТ и решетки голографического фильтра. Значения коэффициентов $c_1(\Delta\lambda)$ и $c_2(\Delta\lambda)$ приведены в табл. 3. Из таблицы следует, что в случае перпендикулярных направлений изотропность импульсного отклика ГКИ существенно выше по сравнению с параллельными направлениями развертки и решетки. Количественно оценить это

можно с помощью отношения c_2/c_1 . Подставляя (5), (6) в (10), получаем

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{\Delta y_2^\perp \Delta y_2^\perp + \Delta x_\lambda}{\Delta y_2^\parallel \Delta y_2^\parallel + \Delta x_\lambda}, \quad (14)$$

т. е. в зависимости от ориентации квазимонохроматической ЭЛТ отношение степеней анизотропии импульсного отклика ГКИ меняется в пределах от $(\Delta y_2^\perp/\Delta y_2^\parallel)^2 \simeq 1,42$ на нулевых пространственных частотах голографических фильтров до $\Delta y_2^\perp/\Delta y_2^\parallel \simeq 1,19$ на пространственных частотах порядка $1/\lambda_2$. Поэтому взаимно перпендикулярные направления развертки и решетки целесообразно применять на малых пространственных частотах. На больших же частотах ориентация ЭЛТ не столь существенна.

Данный коррелятор использовался для распознавания объектов по их изображениям. Согласно блок-схеме ОЭС (см. рис. 1), на вход коррелятора подавались ОИ, которые являлись результатом предварительной обработки РИ в цифровом видеопроцессоре. Рассмотрим вопрос эффективности такой предобработки, которая во многом определяет достоверность распознавания. Основная задача этого процесса состояла в устранении влияния неоднородности освещения по полю РИ, его оконтуривании и контрастировании. Для этой цели первоначально использовались модификации линейных операторов Лапласа, отличающиеся между собой как областью задания (3×3 , 5×5), так и весовыми коэффициентами. Причем коэффициенты выбирались таким образом, чтобы интеграл от импульсного отклика был равен нулю. За счет этого в процессе оконтуривания отфильтровывался низкочастотный шум и происходило автоматическое сглаживание неоднородности постоянной составляющей ОИ. При реализации таких операторов в видеопроцессоре блок сдвигов осуществлял параллельный сдвиг всего телевизионного кадра в положение соответствующего элемента импульсного отклика, в АЛУ выполнялись операции сложения и вычитания в зависимости от вида каждого элемента импульсного отклика, блок НПИ при этом отключался. Дальнейшее контрастирование (после оконтуривания) осуществлялось в блоке НПИ различными пороговыми преобразованиями. Эффективность предобработки изображений реальных объектов такими операторами определялась визуально путем вывода ОИ через ЦАП на ТВ-монитор, а также как результат реализации всего процесса распознавания, т. е. на основе оценки экспериментально полученных соотношений авто- и кросскорреляционных отсчетов. И тот и другой способ показали недостаточную эффективность линейных алгоритмов предобработки РИ. Так, динамический диапазон оконтуренных изображений оказался не более диапазона шумовых составляющих, поэтому никакими нелинейными и пороговыми операциями при контрастировании невозможно отделить их друг от друга. При этом отношение авто- и кросскорреляционных отсчетов получилось близким к 1 и распознать искомые изображения по корреляционным функциям ОИ и ЭИ без их дополнительной апостериорной обработки оказалось невозможным. Под отношением авто- и кросскорреляционных отсчетов в данном случае понималось отношение максимального значения корреляционных функций, полученных для изображений одинаковых объектов (с различными ракурсами), к максимальному значению корреляционных функций в случае, когда ЭИ и РИ представляют собой изображения различных объектов.

В качестве нелинейных операторов предобработки в работе использовались преобразования вида

$$f(x_i) = G_2 \left[\sum_{k=1}^{N_0} G_1 \left[\sum_{j=1}^N \tilde{f}(x_{i+j}) \tilde{h}_k(x_j) \right] \right], \quad (12)$$

где $G_1[\cdot]$, $G_2[\cdot]$ — нелинейные операторы; $f(\cdot)$ — ОИ; $\tilde{f}(\cdot)$ — РИ; $\{h_i(\cdot)\}$ — набор из N_0 импульсных откликов для каждого преобразования, заданных на квадрате размерностью $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$, причем, как и в случае линейных операторов, $\sum_{j=1}^N h_k(x_j) = 0$ для каждого K . В частности, преобразование Собела [9] описывается выражением (12) при $N_0 = 2$, $N = 9$, $G_1[f] = af^2$, $G_2[f] = b\sqrt{f}$, а его модификации отличаются значениями указанных параметров, благодаря чему можно менять ширину и интенсивность контуров ОИ, а также повышать или понижать степень изотропности обработки.

С точки зрения удобства программирования блока НПИ в работе в основном применялось пороговое преобразование $G_2[f]$ и $G_1[f] = a|f|$, что дало возможность существенно увеличить динамический диапазон оконтуренных изображений и с помощью указанных выше операторов контрастирования отделить их от шумовых составляющих.

Наиболее эффективными с точки зрения распознавания изображений оказались два алгоритма предобработки с модульным преобразованием $G_1[\cdot]$: а) $N_0 = 2$, $N = 9$ и $\{h_i(\cdot)\}$ аналогичен набору импульсных откликов оператора Собела; б) $N_0 = 8$, $N = 9$ и $\{h_i(\cdot)\}$ представляют собой два ненулевых знакопеременных элемента, один из которых всегда является центральным в матрице, а второй — последовательно периферийным. При этом оператор G_2 применялся для контрастирования изображений. В результате получено более чем двукратное превышение автокорреляционных отсчетов над кросскорреляционными в выходной плоскости ГКИ, что с точностью до 15–20 % соответствует теоретическому расчету. Это позволило распознать искомые изображения без дополнительной апостериорной обработки, с помощью лишь порогового преобразования.

При реализации процесса распознавания в качестве РИ использовались изображения реальных объектов с углом места $\beta = 6^\circ$ и произвольными ориентацией и масштабом, причем существенное отличие β от 90° совместно с изменением ориентации приводило к ракурсным преобразованиям. Входное поле представляло собой горизонтальную полосу, что дало возможность формировать импульсный отклик фильтров в виде вертикальной полосы с набором ЭИ и применять такую многоканальность с целью обеспечения инвариантности к ракурсным преобразованиям. При этом экспериментальные исследования показали, что для РИ выбранного объекта степень изменения контура перемещена в области различных азимутальных углов α_a и поэтому дискретность изменения углов ЭИ составляла величину $\delta = 15^\circ$ в диапазоне $-30^\circ \leq \alpha_a \leq 30^\circ$, $150^\circ \leq \alpha_a \leq 210^\circ$ и $\delta = 30^\circ$ в диапазоне $30^\circ \leq \alpha_a \leq 150^\circ$, $210^\circ \leq \alpha_a \leq 330^\circ$. Корреляционная функция таких РИ и ЭИ представляла собой распределение интенсивности с горизонтальной пространственной координатой, проективно сопряженной в данном направлении с полем РИ, и периодической (по числу каналов) вертикальной координатой, являющейся пространственной внутри каждого канала. Согласование масштабов РИ и ЭИ обеспечивалось за счет перемещения голографических фильтров вдоль оптической оси.

Распознаваемые изображения, обработанные с помощью модифицированного оператора Собела, о котором шла речь выше, приведены на рис. 4. Видно, что в результате предобработки произошло оконтуривание РИ, устранены влияния неоднородности освещения, подавление низкочастотных шумов и бинаризация контуров. Такое ОИ с произвольно выбранным азимутальным углом в диапазоне $\alpha_a \approx 55^\circ \pm 5^\circ$ высвечивалось на экране ЭЛТ. В качестве ЭИ использовался набор контурных изображений грузового автомобиля с указанными выше значениями α_a , β . Голографические фильтры регистрировались на песочной частоте $\nu = 300 \text{ мм}^{-1}$. Световое распределение, полученное в выходной плоскости ГКИ, показано на рис. 5, где левый и правый столбцы представля-

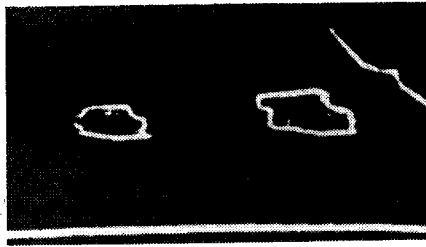


Рис. 4

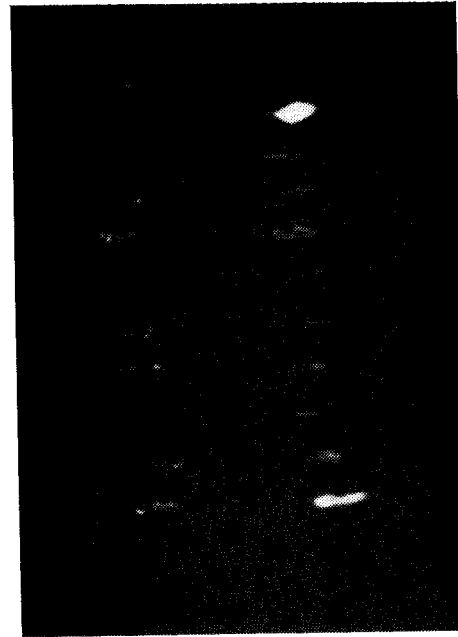


Рис. 5

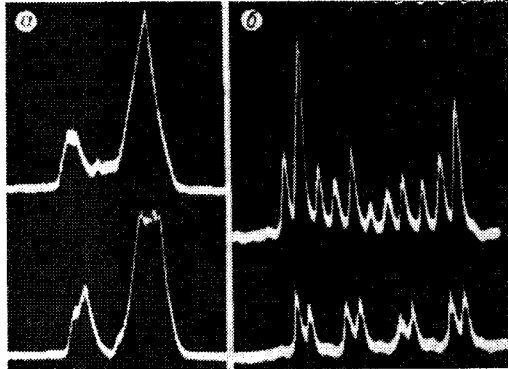


Рис. 6

ют собой соответственно функции корреляции изображений легкового и грузового автомобилей с ЭИ. Наиболее яркие отсчеты соответствуют каналам с $\alpha_a = 60^\circ$ (вверху) и $\alpha_a = 30^\circ$ (внизу). Результаты сканирования корреляционных функций в горизонтальном и вертикальном направлениях через условные центры ОИ приведены на рис. 6, а, б, причем на рис. 6, а даны лишь осциллограммы указанных выше двух каналов. Видно более чем двукратное превышение корреляционного отсчета в канале, соответствующем ближайшему к РИ ракурсу ЭИ, над всеми кросскорреляционными отсчетами, что позволяет с помощью порогового преобразования распознать изображения искомых объектов. Что же касается незначительности различия (по величине, по не по форме) между корреляционными отсчетами двух ближайших к ракурсу РИ каналов, то она характеризует отсутствие необходимости в малых значениях угла дискретности и показывает, что небольшого числа каналов достаточно для обеспечения инвариантности процесса распознавания изображений к ракурсным преобразованиям. Кроме того, следует отметить факт большей анизотропии c_1 приведенных на рис. 5 корреляционных функций по сравнению с данными табл. 3, что обусловлено дополнительным их уширением по горизонтальной координате за счет вытянутой вдоль нее формы РИ. Достигнутая точность определения координат изображений составляла один элемент (поперечный размер строки, параллельной голографической решетке) ТВ-камеры, используемой в данных экспериментальных исследованиях в качестве ФПУ, и три элемента по перпендикулярной ей координате.

В работе проведены исследования ОЭС с вводом изображений через ЭЛТ и предварительной обработкой РИ в видеопроцессоре. Теоретически и экспериментально определено влияние параметров схемы и элементов ГКИ на разрешение коррелятора. Получена зависимость анизотропии корреляционной функции от направления развертки ЭЛТ, ширины спектра излучения, частоты решетки голографического фильтра. Для созданного ГКИ с квазимонохроматической ЭЛТ при $\Delta\lambda = 6,7$ нм в диапазоне частот голографического фильтра $200-600$ мм^{-1}

степень анизотропии при горизонтальной развертке меняется в диапазоне 1,49—3,12, а при вертикальной — 1,96—3,90. Основным фактором, определяющим ограничение разрешения коррелятора при фиксированном разрешении ЭЛТ, является дисперсионное уширение на голографической решетке. Так, для $\Delta\lambda = 2,7$ нм и $\nu = 200$ мм⁻¹ дисперсионное уширение $\Delta x_d \approx 26$ мкм, уширение же на апертуре голограммы (при диаметре ≈ 5 мм) составляет ~ 13 мкм. Реализовано распознавание реальных объектов. Проведена экспериментальная оценка эффективности обработки различными операторами с последующим контрастированием. При использовании нелинейных операторов получено близкое к теоретическому отношение авто- и кросскорреляционных отсчетов в процессе распознавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malloney W. T. Real-time holographic filtering of oscilloscope traces // Appl. Opt.— 1971.— N 11.— P. 2254.
2. Волков Л. В., Ларкин А. И., Маркилов А. А. и др. Применение телевизионной ЭЛТ в голографическом корреляторе и схеме записи фурье-голограмм // Оптические и оптико-электронные методы обработки изображений и сигналов.— Л.: ЛИЯФ, 1982.
3. Sherman R. C., Grieser D., Gamble F. T. e. a. Hybrid incoherent optical pattern recognition system // Appl. Opt.— 1983.— N 22.— P. 3579.
4. Коржов Е. И., Опарин А. И., Полежаев В. В., Потатуркин О. И. Многоканальный голографический коррелятор интенсивности с квазимонохроматической ЭЛТ // Автометрия.— 1987.— № 2.
5. Беломестных В. А., Касперович А. И., Попов Ю. А. и др. Цифровая телевизионная видеосистема // Автометрия.— 1984.— № 5.
6. Козик В. И., Пезжевенко Е. С., Попов Ю. А. и др. Обработка изображений с использованием видеопроцессора и светодиодного коррелятора // Автометрия.— 1985.— № 3.
7. Коржов Е. И., Опарин А. И., Потатуркин О. И. Безлизовый голографический коррелятор // Оптическая и цифровая обработка изображений.— Л.: Наука, 1987.
8. Козик В. И., Потатуркин О. И. Исследование влияния продольных сдвигов голографического фильтра на взаимный масштаб коррелируемых изображений // Автометрия.— 1987.— № 2.
9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.— Т. 2.

Поступила в редакцию 6 августа 1987 г.