

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.319.15 : 681.332 : 535.317

С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУЙ
 (Новосибирск)

ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе [1] рассмотрена некогерентная оптическая система, реализующая параллельно-последовательный способ разложения изображений по функциям Уолша, принимающим лишь два значения: $+1$ и -1 . Покажем, что при введении незначительных изменений эта система может быть применена также для спектрального анализа изображений по «полутонным» базисным функциям, т. е. функциям, которые принимают непрерывный ряд значений: $\varphi_{ij}(x, y) = \varphi_i(x)\varphi_j(y)$, $i, j = 0, \dots, N-1$.

Структурная схема модифицированной оптической системы приведена на рис. 1. Она содержит протяженный источник света 1, транспарант 2 с силуэтной записью функции разложения $\varphi_i(x)$, интегрирующие

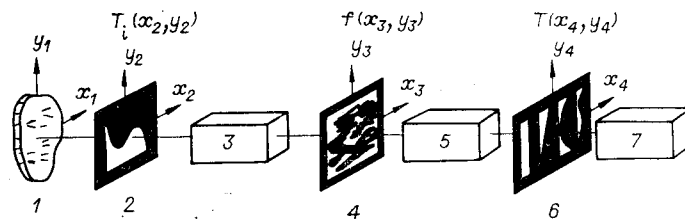


Рис. 1.

звенья 3 и 5, анализируемое изображение 4 с функцией пропускания $f(x, y)$, транспарант 6 с многодорожечной силуэтной записью функций $\varphi_j(y)$ ($j = 0, \dots, N-1$) и многоканальный интегратор 7. Для простоты будем считать, что функции базиса разложения неотрицательны, т. е. $\varphi_i(x) \geq 0$, $\varphi_j(y) \geq 0$, и удовлетворяют условию $\max \varphi_i(x) = \max \varphi_j(y) = 1$.

Если рабочее поле системы Ω имеет размеры $A \times D$, то функция пропускания транспаранта 2 может быть представлена в виде

$$T_i(x_2, y_2) = \text{rect}\left(\frac{x_2}{A}\right) \text{rect}\left(\frac{y_2 + D/2 - D\varphi_i(x_2)/2}{D\varphi_i(x_2)}\right), \quad (1)$$

где

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq 1/2; \\ 0, & |z| > 1/2. \end{cases}$$

На транспаранте b содержится N параллельных дорожек S_j шириной $d=A/N$ с силуэтными записями функций $\varphi_j(y)$. В этом случае функция пропускания этого транспаранта

$$T(x_4, y_4) = \sum_{j=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{y_4}{D}\right) \text{rect}\left(\frac{x_4 + A/2 - jd - d\varphi_j(y_4)/2}{d\varphi_j(y_4)}\right). \quad (2)$$

Согласно [2], интегрирующее звено 3 формирует в плоскости $x_3 y_3$ распределение интенсивности света, пропорциональное функции $\varphi_i(x_3)$, которое модулируется изображением $f(x_3, y_3)$ и интегрируется по координате x_3 звеном 5 . В результате в плоскости $x_4 y_4$ получаем световое распределение, пропорциональное

$$z(y_4) = \int_{-A/2}^{A/2} f(x_3, y_4) \varphi_i(x_3) dx_3. \quad (3)$$

Далее распределение (3) модулируется транспарантом с пропусканием $T(x_4, y_4)$ и интегрируется многоканальным интегратором 7 в пределах каждой силуэтной дорожки S_j , что обеспечивает одновременное вычисление N спектральных компонентов, соответствующих элементам i -й строки матрицы $[c_{ij}]$:

$$c_{ij} = \int_{S_j} \int_{\Omega} T(x_4, y_4) z(y_4) dx_4 dy_4 = dD \int_{\Omega} f(x, y) \varphi_i(x) \varphi_j(y) dx dy, \quad j=0, \dots, N-1. \quad (4)$$

Производя смену транспарантов $T_i (i=0, \dots, N-1)$ в плоскости $x_2 y_2$, на выходе системы получим последовательно значения элементов N строк матрицы $[c_{ij}]$.

Анализ изображений по знакопеременным функциям $\varphi_i(x) = \varphi_i^+(x) - \varphi_i^-(x)$, $\varphi_j(y) = \varphi_j^+(y) - \varphi_j^-(y)$ ($\varphi_i^+(x)$, $\varphi_j^+(y)$ — положительные, $\varphi_i^-(x)$, $\varphi_j^-(y)$ — отрицательные части функций) осуществляется аналогичным образом. Вначале вычисляются составляющие c_{ij}^{++} , c_{ij}^{--} , c_{ij}^{+-} , c_{ij}^{-+} , соответствующие разложению изображения, согласно (4), по положительным и отрицательным частям базисных функций, а затем проводится их алгебраическое суммирование по формуле

$$c_{ij} = c_{ij}^{++} + c_{ij}^{--} - c_{ij}^{+-} - c_{ij}^{-+}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что для получения $N \times N$ спектральных компонентов c_{ij} в рассмотренной системе необходимо обеспечить около $4N$ операций смен силуэтных изображений функций $\varphi_i^+(x)$, $\varphi_i^-(x)$, $\{\varphi_j^+(y)\}$, $\{\varphi_j^-(y)\}$.

С целью сокращения времени анализа изображений можно пойти по пути задания на транспарантах биполярных функций разложения $\varphi_i(x)$ со смещением, т. е. в виде $(\varphi_i(x) + a_i)/M_i$, где параметры a_i выбираются из условия $\varphi_i(x) + a_i \geq 0$ (M_i — масштабные множители). Аналогичным образом записываются на транспаранте b функции $\varphi_j(y)$.

Можно показать, что в этом случае значения спектральных компонентов c_{ij} получаются из выражения

$$c_{ij} = 4A_{ij} - 2(A_{i0} + A_{0j}) + A_{00}, \quad (6)$$

где A_{ij} — коэффициенты разложения изображения по базисным функциям со смещением (при условии $a_i=1$, $\varphi_0(x) = \varphi_0(y) = 1$, $M_i=2$, что имеет место для широкого класса нормированных базисных функций). При этом для определения $N \times N$ спектральных компонентов c_{ij} достаточно N операций смен силуэтных изображений функций в плоскости $x_2 y_2$.

Однако этот способ вычисления компонентов уступает по точности ранее описанному, предполагающему отдельное задание изображений

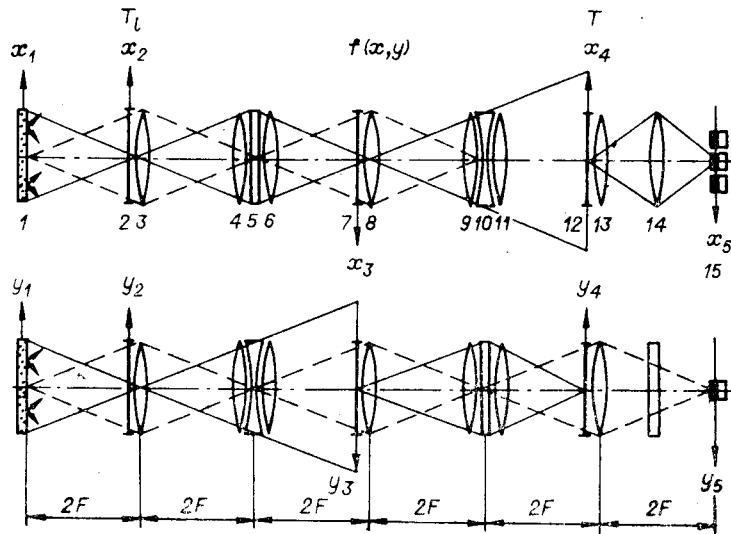


Рис. 2.

положительных и отрицательных частей базисных функций. Действительно, если Δ — абсолютная погрешность, получаемая в результате каждого измерения, то погрешности нахождения спектральных компонентов, согласно (5), (6), не превышают соответственно 4Δ и 9Δ .

Таким образом, выбор вида задания силуэтных изображений функций разложения определяется как допустимой погрешностью вычисления спектральных компонентов, так и требуемым временем анализа изображений.

Принципиальная схема оптической системы, предназначенной для параллельного вычисления строки спектральных компонентов разложения изображения по выбранному базису, приведена на рис. 2, где 1 — источник света (диффузный рассеиватель); 2 и 12 — силуэтные транспаранты T_i и T ; 3, 8, 13 — согласующие конденсорные линзы; 7 — анализируемое изображение $f(x, y)$. Интегрирующие звенья выполнены из сферических объективов 4, 6, 9, 11 и цилиндрических отрицательных линз 5, 10. Сферическая и цилиндрическая линзы 13, 14 и линейка фотоприемников 15 образуют выходной многоканальный интегратор. При этом линза 13 проектирует источник света по координате y , а линза 14 — плоскость транспаранта T по координате x в плоскость линейки фотоприемников.

Для определения требований к основным параметрам системы найдем ее импульсный отклик $h_i(x_3, y_3; j)$. Для этого рассмотрим все световые лучи, проходящие через точку (x_3, y_3) . Из анализа рис. 2 можно получить следующие соотношения между координатами точек пересечения светового луча, выходящего из плоскости источника со светимостью $J(x_1, y_1)$, с различными плоскостями оптической системы:

$$\begin{aligned} x_5 &= x_3 + x_1/K, & x_2 &= x_3, & x_4 &= x_5, \\ y_1 &= y_5, & y_2 &= y_3 - y_5/K, & y_4 &= y_3, \end{aligned} \quad (7)$$

где $K = F_n/2F$ (F_n и $2F$ — фокусные расстояния соответственно отрицательных цилиндрических линз 5, 10 и сферических объективов 4, 6, 9, 11). Учитывая протяженность источника света и связи между координатами (7), для импульсного отклика системы в приближениях геометрической оптики и малых угловых размеров источника света и рабочего

поля системы можно получить следующее выражение:

$$\tilde{h}_i(x_3, y_3; j) = K \int_{\Omega} J [K(x_5 - x_3), y_5] T_i(x_3, y_3 - y_5/K) T(x_5, y_3) dx_5 dy_5. \quad (8)$$

С учетом (1), (2), (7) выражение (8) перепишем в виде

$$\tilde{h}_i(x_3, y_3; j) = K \int_{R_x} \int_{R_y} J [K(x_5 - x_3), y_5] dy_5 dx_5, \quad (9)$$

где R_y и R_x определяются соответственно неравенствами:

$$\begin{aligned} K(D/2 + y_3) \geq y_5 \geq K(D/2 + y_3 - D\varphi_i(x_3)); \\ -A/2 + jd + d\varphi_j(y_3) \geq x_5 \geq -A/2 + jd. \end{aligned} \quad (10)$$

В предположении, что

$$J(x_1, y_1) = J_0 = \text{const} \text{ при } |x_1| \leq KA, |y_1| \leq KD, \quad (11)$$

для импульсного отклика системы из (9) имеем

$$h_i(x_3, y_3; j) = J_0 K^2 D d \varphi_i(x_3) \varphi_j(y_3). \quad (12)$$

Если теперь анализируемое изображение поместить в плоскость $x_3 y_3$, то в результате интегрирования по координатам x_3, y_3 на выходе системы, согласно (12), получим значения N спектральных компонентов матрицы $[c_{ij}]$.

Таким образом, выражение (11) определяет условия функционирования описанной оптической системы. Оно накладывает требования на размер источника света (или при заданной его конфигурации на параметр K интегрирующих звеньев) и на равномерность светимости его по полю.

Погрешность вычисления компонентов зависит от точности задания силуэтных изображений функций разложения, неравномерности светимости источника света, линейности фотоприемников и т. д. Проведем оценки погрешностей, обусловленных некоторыми из указанных факторов.

Неточность задания силуэтных изображений функций разложения приводит к искажению функций: $\varphi_i(x) \rightarrow \varphi_i(x) + \Delta_i(x)$, $\varphi_j(y) \rightarrow \varphi_j(y) + \Delta_j(y)$. При наличии этой ошибки спектральные компоненты можно представить в виде $\tilde{c}_{ij} = c_{ij} + \Delta_{ij}$, где Δ_{ij} — погрешности их определения:

$$\Delta_{ij} \approx \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i(x) \Delta_j(y) dx dy + \iint_{\Omega} f(x, y) \Delta_i(x) \varphi_j(y) dx dy. \quad (13)$$

Из (13) при $\varphi_0(x) = \varphi_0(y) = 1$ получим следующую оценку приведенной погрешности вычисления:

$$\Delta_1 = \frac{\Delta_{ij}}{c_{00}} \leq \max \Delta_i(x) + \max \Delta_j(y) = \varepsilon \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right), \quad (14)$$

где ε — абсолютная ошибка силуэтного задания амплитуды функции разложения. Например, если силуэтные транспаранты изготовлены с помощью фотопостроителя на основе ЭЛТ [3], для которого параметр ε составляет величину порядка 0,02 мм, то при $D = 24$ мм, $d = 2$ мм погрешность Δ_1 , как следует из (14), не превышает 1%.

Для определения влияния неравномерности светимости источника света по полю на точность вычисления спектральных компонентов представим функцию $J(x_1, y_1)$ в виде

$$J(x_1, y_1) = J_0 [1 - \psi(x, y_1)],$$

где функция $\psi(x_1, y_1)$ описывает отклонение светимости J источника от равномерной J_0 . Тогда импульсный отклик системы, согласно (9), (12),

равен

$$\tilde{h}_i(x_3, y_3; j) = h_i(x_3, y_3; j) - \Delta h_i(x_3, y_3; j),$$

где

$$\Delta h_i(x_3, y_3; j) = J_0 K \int_{R_x} \int_{R_y} \psi [K(x_5 - x_3), y_5] dy_5 dx_5. \quad (15)$$

Из (15) имеем следующую оценку для $\Delta h_i(x_3, y_3; j)$:

$$\Delta h_i(x_3, y_3; j) \leq B J_0 K^2 D d \varphi_i(x_3) \varphi_i(y_3) = B h_i(x_3, y_3; j), \quad (16)$$

где $B = \max_S \psi(x_1, y_1)$, а S — область источника, определяемая из условия (11).

Используя (12) и (16), окончательно для рассматриваемой составляющей погрешности Δ_2 получим

$$\Delta_2 = \frac{1}{c_{00}} \int_{\Omega} f(x_3, y_3; j) \Delta h_i(x_4, y_3; j) dx_3 dy_3 \leq B. \quad (17)$$

Таким образом, при неравномерности светимости источника в области S в 1% погрешность Δ_2 , согласно (17), не превышает 1%.

Размерность N матрицы спектральных компонентов, вычисляемой данным методом, определяется допустимым количеством силуэтных дорожек с записью базисных функций $\varphi_j(y)$ на транспаранте T . Она может быть увеличена за счет расширения размера этого транспаранта по координате x . Обозначим его через A' ($A' \geq A$). В этом случае размерность

$$N = A'/d. \quad (18)$$

Величина d в (18) зависит от требуемого динамического диапазона силуэтной записи $L = 20 \lg \frac{d}{\epsilon}$ (дБ) и параметра ϵ . При использовании существующих фотопостроителей количество дорожек записи может быть доведено до 60 и более при диапазоне записи L в 40 дБ ($A' = 100$ мм, $\Delta_1 = 1\%$).

Приведем теперь результаты экспериментального исследования оптической системы. Размер рабочего поля в плоскости транспаранта T_i составлял 14×14 мм, а в плоскости транспаранта $T - 14 \times 20$ мм.

В качестве базисов разложения выбраны степенные функции x^i, y^j и полиномы Лежандра $P_i(x), P_j(y)$ ($i, j = 0, 1, \dots, 7$). Вид силуэтных транспарантов при раздельном задании и задании полиномов Лежандра со смещением показан на рис. 3, 4. Анализировалось тестовое изображение типа «крест» (рис. 5).

В табл. 1 приведены значения спектральных компонентов, соответствующих разложению этого изображения по положительным и отрицательным частям степенных функций. В верхних частях клеток даны расчетные значения компонентов, в нижних — экспериментальные. Можно видеть, что максимальная и средняя приведенные погрешности вычислений не превышают соответственно 2,2 и 0,2%.

Результаты анализа «креста» по полиномам Лежандра сведены в табл. 2 (раздельное задание положительных и отрицательных частей полиномов) и табл. 3

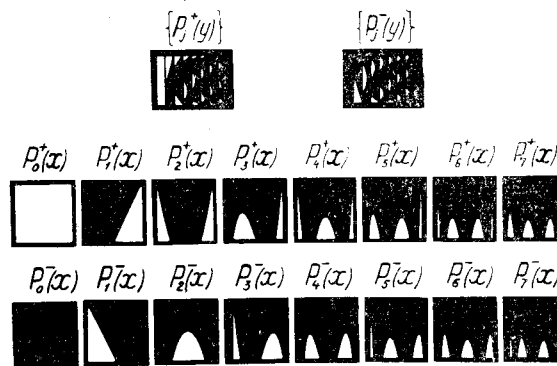


Рис. 3.

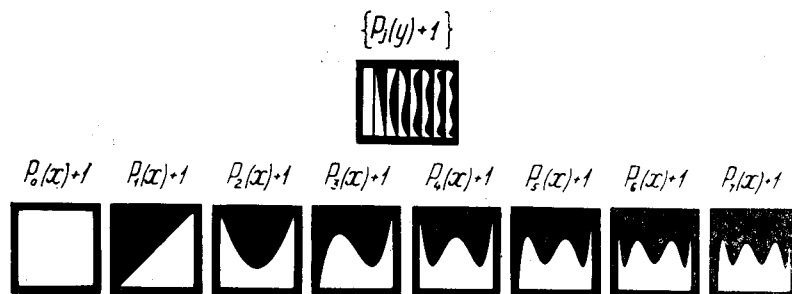


Рис. 4.

(полиномы со смещением). В числителе указаны экспериментальные значения спектральных компонентов, в знаменателе — погрешности их определения в процентах. Максимальные приведенные погрешности вычислений компонентов составили 1,4 и 3,2%, а средние — соответственно 0,3 и 0,96%.

З а к л ю ч е н и е. Рассмотренная оптическая система позволяет проводить параллельно-последовательный спектральный анализ изображений по «полутоновым» базисам с разделяющимися переменными при средней погрешности определения спектральных компонентов порядка 1%.



Рис. 5.

Необходимость обеспечения заданного динамического диапазона силуэтной записи базисных функций $\{\varphi_j(y)\}$ ограничивает размерность вычисляемой матрицы компонентов ($N=60$ при $L=40$ дБ). Она может быть заметно увеличена при полутоновой записи этих функций, что, однако, связано с трудностями контроля прозрачности регистрирующей среды с приемлемой точностью.

Представляется перспективным применение оперативных устройств записи информации для последовательного ввода в оптическую систему силуэтных изображений функций $\varphi_i(x)$.

Описанный метод спектрального анализа изображений может быть использован для кодирования изображений с целью их передачи или хранения, при распознавании изображений на этапе выделения признаков и т. д.

Авторы выражают свою признательность канд. техн. наук П. Е. Твердохлебу за помощь и внимание, проявленные при выполнении данной работы.

Таблица 1

1	0	0,199	0	0,114	0	0,082	0
1	0,009	0,186	0,004	0,098	0,005	0,065	0,002
0	0	0	0	0	0	0	0
0,011	0,002	0,0004	0,0008	0	0,0004	0	0,0008
0,199	0	0,008	0	0,003	0	0,002	0
0,185	0,0008	0,006	0,0004	0,003	0	0,002	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0,008	0,0016	0,0012	0	0,0004	0,0004	0	0
0,114	0	0,003	0	0,0002	0	0,0001	0
0,093	0	0,002	0	0,008	0	0,0004	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0,0008	0	0,0004	0	0	0	0	0
0,082	0	0,002	0	0,0001	0	0	0
0,066	0,0004	0,0012	0	0,0004	0	0,0004	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

$\frac{1}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{-0,2058}{0,5}$	$\frac{-0,0138}{1,38}$	$\frac{0,1206}{0,8}$	$\frac{-0,0066}{0,66}$	$\frac{-0,0868}{0,5}$	$\frac{-0,0061}{0,61}$
$\frac{-0,0119}{1,2}$	$\frac{-0,0003}{0,03}$	$\frac{0,0045}{0,45}$	$\frac{0,0003}{0,03}$	$\frac{-0,0032}{0,32}$	$\frac{0,0003}{0,03}$	$\frac{0,0016}{0,16}$	$\frac{0,0}{0,0}$
$\frac{-0,1424}{1,4}$	$\frac{0,004}{0,13}$	$\frac{-0,0136}{0,6}$	$\frac{0,0013}{0,11}$	$\frac{-0,0110}{0,1}$	$\frac{0,0031}{0,03}$	$\frac{-0,0095}{0,3}$	$\frac{0,0016}{0,16}$
$\frac{-0,0081}{0,8}$	$\frac{0,0024}{0,24}$	$\frac{0,0012}{0,12}$	$\frac{0,0011}{0,11}$	$\frac{-0,001}{0,1}$	$\frac{0,0024}{0,24}$	$\frac{-0,0013}{0,13}$	$\frac{0,0021}{0,21}$
$\frac{-0,0757}{0,6}$	$\frac{0,0008}{0,08}$	$\frac{-0,0122}{0,1}$	$\frac{0,0005}{0,05}$	$\frac{0,0077}{0,1}$	$\frac{0,0008}{0,08}$	$\frac{-0,004}{0,1}$	$\frac{0,0005}{0,05}$
$\frac{-0,0074}{0,7}$	$\frac{-0,002}{0,2}$	$\frac{0,0013}{0,13}$	$\frac{0,0014}{0,14}$	$\frac{-0,001}{0,1}$	$\frac{0,0013}{0,13}$	$\frac{-0,0011}{0,11}$	$\frac{-0,0011}{0,11}$

Таблица 3

$\frac{1}{00}$	$\frac{-0,006}{0,6}$	$\frac{-0,229}{2,8}$	$\frac{-0,034}{3,4}$	$\frac{0,1136}{1,5}$	$\frac{-0,016}{1,6}$	$\frac{-0,1049}{2,3}$	$\frac{-0,0255}{2,55}$
$\frac{-0,002}{0,2}$	$\frac{0,001}{0,1}$	$\frac{0,0026}{0,26}$	$\frac{0,0016}{0,16}$	$\frac{0,002}{0,2}$	$\frac{0,0017}{0,17}$	$\frac{0,002}{0,2}$	$\frac{0,0066}{0,66}$
$\frac{-0,1809}{2}$	$\frac{-0,001}{0,1}$	$\frac{-0,024}{0,7}$	$\frac{0,0131}{1,31}$	$\frac{0,0324}{1,2}$	$\frac{0,0044}{0,44}$	$\frac{0,0001}{1,2}$	$\frac{0,0139}{1,39}$
$\frac{0,0208}{2,08}$	$\frac{-0,0032}{0,32}$	$\frac{-0,003}{0,3}$	$\frac{0,0016}{0,16}$	$\frac{0,0071}{0,71}$	$\frac{-0,0025}{0,25}$	$\frac{-0,0022}{0,22}$	$\frac{0,0023}{0,23}$
$\frac{0,1601}{3,1}$	$\frac{-0,0125}{1,25}$	$\frac{0,0016}{1,85}$	$\frac{-0,0124}{1,24}$	$\frac{-0,0162}{0,33}$	$\frac{-0,0073}{0,73}$	$\frac{-0,0069}{1,5}$	$\frac{0,0023}{0,23}$
$\frac{0,032}{3,2}$	$\frac{-0,0051}{0,51}$	$\frac{-0,0052}{0,52}$	$\frac{0,0043}{0,43}$	$\frac{0,0098}{0,98}$	$\frac{0,0048}{0,48}$	$\frac{0,0006}{0,06}$	$\frac{0,0051}{0,51}$
$\frac{-0,0719}{0,98}$	$\frac{0,006}{0,6}$	$\frac{-0,0007}{1,26}$	$\frac{0,014}{1,47}$	$\frac{0,0302}{2,2}$	$\frac{0,016}{1,6}$	$\frac{0,0116}{1,67}$	$\frac{1,0161}{1,61}$
$\frac{-0,016}{1,6}$	$\frac{-0,0036}{0,36}$	$\frac{0,0014}{0,14}$	$\frac{0,0012}{0,12}$	$\frac{0,0068}{0,68}$	$\frac{0,0064}{0,64}$	$\frac{0,0068}{0,68}$	$\frac{0,0066}{0,66}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— «Автометрия», 1974, № 6.
2. О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Обобщенный спектральный анализ изображений с использованием силуэтных фильтров.— «Автометрия», 1973, № 5.
3. Г. М. Мамонтов, А. К. Поташников, В. П. Радзюкевич, А. И. Рыбин, С. Е. Ткач. Использование устройства вывода информации из ЭВМ на микрофильм для автоматического изготовления фотошаблонов.— «Упр. системы и машины», 1974, № 5.

Поступила в редакцию 13 февраля 1975 г.

УДК 535.853.4

В. А. АРБУЗОВ, А. Г. ПОЛЕЩУК, В. А. ФЕДОРОВ
(Новосибирск)

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ТЕНЕВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Для получения информации о поле коэффициента преломления исследуемой оптической среды либо иных физических величин, функционально с ним связанных, широко используют теневые, интерференционные и интерференционно-теневые приборы. Последний тип приборов формирует одновременно два изображения, каждое из которых по-своему функционально связано с исследуемой оптической средой. Такая избыточная форма представления информации позволяет получать в конечном счете более достоверные оценки параметров поля. Чаще всего интерференционно-теневые приборы создают на базе теневых приборов [1, 2]. Полученные с их помощью изображения неоднородностей оптических сред обычно представляют собой наложение интерференционного изображения на теневое, либо эти изображения разделяно выносятся на разные экраны. Наложение изображений уменьшает контраст интерференционных полос и приводит к ухудшению метрологических характеристик устройства. Наличие же двух экранов, а следовательно, и двух синхронизируемых фоторегистраторов усложняет схему. В этой связи нами разработана методика получения интерференционно-теневого изображения, которые не налагаются друг на друга. Интерференционное изображение легко может быть получено на любом участке теневого изображения, и наоборот. Устройство, обеспечивающее такой режим визуализации, изображено на рис. 1.

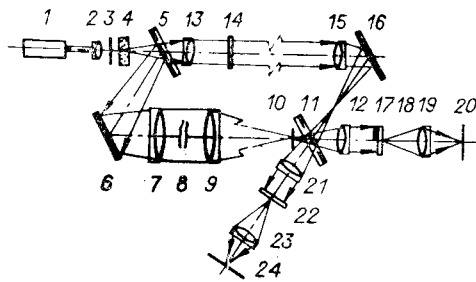


Рис. 1.

Работает оно следующим образом. С помощью последовательно размещенных лазера 1, микрообъектива 2 и диафрагмы 3 формируется источник монохроматического света. Далее лучи света проходят через двоякопреломляющую пластинку 4 исландского шпата, вырезанную под углом к ее оптической оси, образуя два пучка, смещенных параллельно