

зультате фильтрации полученное изображение имеет ряд реверсированной контраста, соответствующих областям изменения знака фазы передаточной функции.

Предложенный способ получения восстанавливающего фильтра непосредственно по импульсному отклику искажающей системы позволяет, с одной стороны, избежать сложных расчетов по определению передаточной функции инверсного или оптимального фильтра, а с другой — существенно снизить трудоемкость получения этого фильтра. Кроме того, появляется возможность оперативного восстановления изображения, если импульсный отклик искажающей системы меняется во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. И. Хургин, В. П. Яковлев. Финитные функции в физике и технике. М., «Наука», 1971.
2. Д. Ж. Строук. Оптические вычисления.— «Автометрия», 1973, № 5.
3. С. W. Helstrom. Image Restoration by the Method of Least Squares.— "JOSA", 1967, v. 57, p. 297—303.
4. Л. М. Сороко. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971.
5. S. Ragansson.— "Physica Scripta", 1970, v. 2.

Поступила в редакцию 29 января 1975 г.

УДК 621.319+681.332+535.317

**Б. Е. КРИВЕНКОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ,
Ю. В. ЧУГУЙ**
(Новосибирск)

НЕКОГЕРЕНТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Преобразования, эквивалентные операции умножения нескольких матриц (с числом строк и столбцов, отличных от единицы) и называемые далее матричными, являются исходными при решении ряда важных практических задач. Они применяются, например, при многоканальной обработке одномерных сигналов и при обработке двумерных изображений (задачи анализа, фильтрации, обнаружения и кодирования).

Вопросы моделирования матричных преобразований оптическими когерентными методами рассматривались в [1—3]. Так, в [1, 2] для умножения двух многоэлементных матриц применена система оптической пространственной фильтрации с голографическим фильтром. Элементы результирующей матрицы вычислялись одновременно и параллельно. Позднее для тех же целей предложена специальная оптическая система, более эффективная с точки зрения использования световой энергии, точности вычислений и организации работы в оперативном режиме [3].

Дальнейшие исследования [4, 5], проведенные в этом направлении, показали, что оптические системы способны производить более сложные преобразования, описываемые произведением трех матриц, и что такие преобразования можно моделировать не только когерентными, но и некогерентными методами. Правда, во вновь разработанных системах элементы результирующей матрицы вычислялись последовательным [4] и параллельно-последовательным [5] способами, предусматривающими смену изображений строк (столбцов) умножаемых матриц.

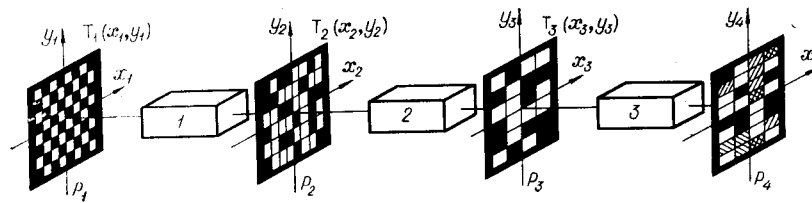


Рис. 1.

Ниже предложена некогерентная оптическая система с параллельным вычислением элементов искомой матрицы. Преобразование, реализуемое системой, описывается матричным уравнением

$$[D] = [A][B][C], \quad (1)$$

где $[A]$, $[B]$, $[C]$ — исходные матрицы размерности $N \times M$, $M \times P$ и $P \times R$ со знакопеременными элементами a_{ij} , b_{jk} , c_{kl} , а $[D]$ — результирующая матрица размерности $N \times R$ с элементами

$$d_{il} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^P a_{ij} b_{jk} c_{kl}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad l = 1, 2, \dots, R.$$

Настоящая работа посвящена рассмотрению структуры и возможностей такой системы, а также результатов ее экспериментального исследования.

Принцип действия. Структурная схема системы, подлежащей обсуждению, показана на рис. 1, где 1 — звено совмещения строк первой матрицы, 2 — звено интегрирования по координате X , а 3 — интегрирующее звено. В плоскостях P_1 , P_2 и P_3 установлены транспаранты T_1 , T_2 и T_3 с изображениями матриц $[A]$, $[B]$ и $[C]$ соответственно.

Если рабочее поле транспаранта, имеющее вид квадрата размерами $L \times L$, разбито на $N \times M$ элементов разрешения — прямоугольников с размерами $\delta x_1 \times \delta y_1$, где $\delta x_1 = L/M$, $\delta y_1 = L/N$, то его функцию пропускания по интенсивности можно представить в виде

$$T_1(x_1, y_1) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \text{rect} \left[\frac{x_1 - (j-1/2)\delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right] \text{rect} \times \\ \times \left[\frac{y_1 - (i-1/2)\delta y_1 + L/2}{\delta y_1} \right]. \quad (2)$$

В выражении (2) a_{ij} — пропускание (i, j) -го элемента транспаранта T_1 , пропорциональное значению соответствующего элемента матрицы $[A]$, а

$$\text{rect}[z] = \begin{cases} 1 & \text{при } |z| \leq 1/2; \\ 0 & \text{при } |z| > 1/2. \end{cases}$$

Функции пропускания транспарантов T_2 и T_3 могут быть описаны аналогичным образом, т. е. в виде

$$T_2(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^P b_{mn} \text{rect} \left[\frac{x_2 - (n-1/2)\delta y_3 + L/2}{\delta y_3} \right] \times \\ \times \text{rect} \left[\frac{y_2 - (m-1/2)\delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right]; \quad (3) \\ T_3(x_3, y_3) = \sum_{k=1}^P \sum_{l=1}^R c_{kl} \text{rect} \left[\frac{x_3 - (l-1/2)\delta x_3 + L/2}{\delta x_3} \right] \times \\ \times \text{rect} \left[\frac{y_3 - (k-1/2)\delta y_3 + L/2}{\delta y_3} \right],$$

где b_{mn} и c_{kl} — пропускания (m, n) -го и (k, l) -го элементов этих транспарантов, пропорциональные значениям соответствующих элементов матриц $[B]$ и $[C]$.

Выделим на транспаранте T_1 изображения строк матрицы $[A]$. С помощью звена I эти изображения проектируются в плоскость P_2 по координате X , расфокусируются по координате Y и накладываются друг на друга под углами, определяемыми координатами их центров. Полученные в плоскости P_2 одномерные световые распределения

$$\sum_{j=1}^M a_{ij} \text{rect} \left[\frac{x_2 - (j - 1/2) \delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right] \times \\ \times \text{rect} \left[\frac{y_2 + L/2}{L} \right], \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

модулируются функцией пропускания транспаранта T_2 , звеном 2 интегрируются по координате X и проектируются в плоскость P_3 по координате Y под разными углами. В результате в плоскости P_3 формируется совокупность одномерных распределений с интенсивностью

$$R_i(y_3) = \sum_{j=1}^M a_{ij} \int_{-L/2}^{L/2} \text{rect} \left[\frac{x_2 - (j - 1/2) \delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right] \times \\ \times T_2(x_2, y_3) dx_2, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

Далее световые распределения (4) модулируются функцией пропускания транспаранта T_3 , звеном 3 проектируются по координате X в плоскость P_4 и интегрируются по координате Y с одновременным разделением световых пучков в соответствии с наклоном исходных изображений строк. Практически это означает, что в рассматриваемой системе плоскость P_1 проектируется по координате Y в плоскость P_4 . Тогда с учетом (3) интенсивность в выходной плоскости будет распределена по закону

$$D(x_4, y_4) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^R \text{rect} \left[\frac{y_4 - (i - 1/2) \delta y_1 + L/2}{\delta y_1} \right] \times \\ \times \text{rect} \left[\frac{x_4 - (l - 1/2) \delta x_3 + L/2}{\delta x_3} \right] \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^P a_{ij} b(k, j) c_{kl}, \quad (5)$$

где

$$b(k, j) = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^P b_{mn} \text{rect} \left[\frac{y_3 - (m - 1/2) \delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right] \times \right. \\ \times \text{rect} \left[\frac{x_2 - (n - 1/2) \delta y_3 + L/2}{\delta y_3} \right] \text{rect} \left[\frac{x_2 - (j - 1/2) \delta x_1 + L/2}{\delta x_1} \right] \times \\ \left. \times \text{rect} \left[\frac{y_3 - (k - 1/2) \delta y_3 + L/2}{\delta y_3} \right] \right\} dx_2 dy_3.$$

Распределение интенсивностей (5) пропорционально результирующей матрице $[D]$ тогда, когда транспарант T_2 в оптической системе повернут на 90° относительно транспарантов T_1 и T_3 , что соответствует операции замены переменных $x_2 = y_2$, а $y_2 = x_2$ [т. е. $T_2(x_2, y_2) \rightarrow T_2(y_2, x_2)$]. В этом случае

$$b(k, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^P b_{mn} \delta_{mj} \delta_{nk} = b_{jk},$$

где δ_{mj} , δ_{nk} — символы Кронекера.

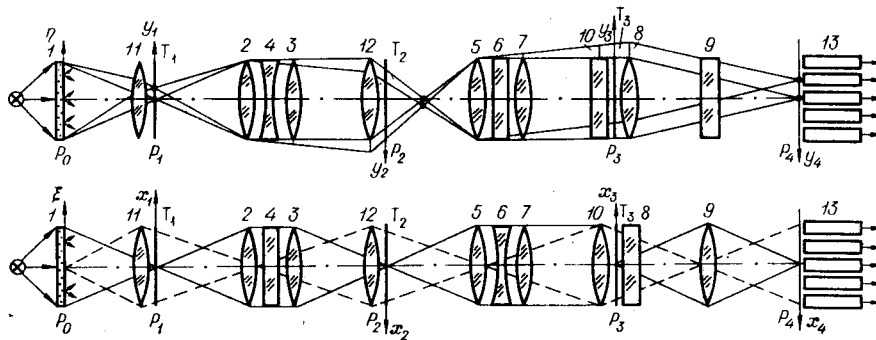


Рис. 2.

По исходному условию матрицы $[A]$, $[B]$ и $[C]$ являются знакопеременными, поэтому необходимо определить прием задания и вычисления отрицательных значений матриц. Поскольку $[A] = [A]^+ - [A]^-$, где $[A]^+$ и $[A]^-$ — матрицы с элементами $a_{ij}^+ \geq 0$ и $a_{ij}^- \geq 0$, то представление матрицы $[A]$ достигается путем раздельной записи положительных матриц $[A]^+$ и $[A]^-$ в виде изображений на транспарантах T_1^+ и T_1^- . Аналогичным образом на транспарантах T_2^+ , T_2^- и T_3^+ , T_3^- задаются матрицы $[B]$ и $[C]$. Если теперь в плоскости P_1 , P_2 и P_3 системы вводить транспаранты* в сочетаниях T_1^+ , T_2^+ , T_3^+ ; T_1^+ , T_2^+ , T_3^- ; ...; T_1^- , T_2^- , T_3^- , то в ее выходной плоскости получим распределение интенсивности света, пропорциональные частным матрицам $[D]^{+++}$, $[D]^{++-}$, ... , $[D]^{---}$. Элементы искомой матрицы $[D]$ вычисляются путем алгебраического суммирования элементов частных матриц, т. е.

$$[D] = [D]^{+++} - [D]^{++-} + \dots - [D]^{---}.$$

Таким образом, определение знаков и абсолютных значений элементов матрицы $[D]$ происходит за 8 последовательных тактов работы оптической системы. На каждом из них должно производиться измерение и реверсивное накопление промежуточных результатов электронными методами. При необходимости указанное число тактов может быть уменьшено до двух. Для этого транспаранты T_1^+ и T_1^- необходимо разместить одновременно в плоскости P_1 вдоль оси Y , а транспаранты T_3^+ и T_3^- — в плоскости P_3 вдоль оси X . Если в плоскости P_2 системы находится транспарант T_2^+ (или T_2^-), то в плоскости P_4 получается четыре неперекрывающихся световых распределения, соответствующих матрицам $[D]^{+++}$, $[D]^{++-}$, $[D]^{-++}$, $[D]^{-+-}$ (или $[D]^{++-}$, $[D]^{-+-}$, $[D]^{+--}$, $[D]^{---}$).

Принципиальная схема системы. На рис. 2 в двух проекциях показана принципиальная схема оптической системы для параллельного вычисления элементов результирующей матрицы в соответствии с выражением (1). Система включает протяженный источник света 1, звено совмещения строк матрицы по координате Y (проектирующие сферические объективы 2, 3 и цилиндрический объектив 4), звено интегрирования по координате X (элементы 5, 6, 7), интегропроектирующее звено (проектирующие цилиндрические объективы 8, 9 и конденсорный цилиндрический объектив 10), а также конденсорные сферические объективы 11 и 12. Ход лучей на схеме показан для случая, когда фокусные расстояния отрицательных цилиндрических объективов 4, 6 равны

* В случае применения управляемых транспарантов операция формирования в плоскостях P_1 , P_2 , P_3 необходимых изображений осуществляется программным путем.

двум совместным фокусным расстояниям сферических объективов 2, 3 (или 5, 7). Проектирование изображений в оптической системе осуществляется в масштабе один к одному. Результирующее световое распределение воспроизводится в выходной плоскости в виде (5), где считается сканирующим или многоэлементным фотоприемником 13.

Импульсный отклик рассматриваемой системы и возможности ее применения существенно зависят от того, какая из плоскостей P_1 , P_2 или P_3 принята в качестве входной. В частности, если предположить, что функции пропускания транспарантов T_1 , T_2 и T_3 по интенсивности являются непрерывными и источник света представляет собой идеальный рассеиватель, то импульсный отклик системы на воздействие, приложенное в точке (x_2, y_2) плоскости P_2 , описывается в приближении геометрической оптики выражением

$$h(x_4, y_4; x_2, y_2) = \int_{\Omega} I(\xi, \eta) T_1(x_1, y_1) T_3(x_3, y_3) \delta(x_4 - x_2 - \xi/k) \times \\ \times \delta(y_4 - y_2 + \eta/k) \left[1 + \frac{(x_1 - \xi)^2}{4F_{\text{сф}}^2} + \frac{(y_1 - \eta)^2}{4F_{\text{сф}}^2} \right]^{-2} d\xi d\eta, \quad (6)$$

где Ω — область, занимаемая источником света с распределением интенсивности $I(\xi, \eta)$, (x_4, y_4) — координаты точки в выходной плоскости, а $k = F_{\text{н}}/2F_{\text{сф}}$ ($F_{\text{н}}$ — фокусное расстояние цилиндрического объектива, $F_{\text{сф}}$ — совместное фокусное расстояние двух сферических проектирующих объективов). Поскольку координаты луча, прошедшего через точки (ξ, η) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) и (x_4, y_4) , в плоскостях P_0 , P_1 , P_2 , P_3 и P_4 связаны соотношениями

$$\begin{cases} x_1 = x_2; \\ x_3 = x_2 + \xi/k; \\ x_4 = x_3; \end{cases} \quad \begin{cases} y_1 = y_2 - \eta/k; \\ y_3 = y_2; \\ y_4 = y_1, \end{cases} \quad (7)$$

то, производя в (6) с учетом (7) интегрирование по переменным ξ, η , получим

$$h(x_4, y_4; x_2, y_2) = I[k(x_4 - x_2), k(y_2 - y_4)] T_1(x_2, y_4) T_3(x_4, y_2) t(x_2, y_2, x_4, y_4),$$

где

$$t(x_2, y_2, x_4, y_4) = \left\{ 1 + \frac{[(1+k)x_2 - kx_4]^2}{4F_{\text{сф}}^2} + \frac{[(1+k)y_4 - ky_2]^2}{4F_{\text{сф}}^2} \right\}^{-2}$$

— функция, описывающая отклонение формы импульсного отклика от идеальной в силу предположений об используемом источнике света и естественного падения освещенности от центра рабочего поля к краю.

Ограничимся малыми угловыми размерами источника и рабочего поля системы, при которых $t(\cdot) \approx 1$. Допуская, что $I(\xi, \eta) = \text{const}$ для $|\xi/k| \leq S/2$ и $|\eta/k| \leq S/2$, где $S \times S$ — рабочая область источника, импульсный отклик с точностью до константы можно описать выражением

$$h(x_4, y_4; x_2, y_2) = T_1(x_2, y_4) T_3(x_4, y_2). \quad (8)$$

Отсюда следует, что отклик системы зависит от координат x_2, y_2 «точечного» воздействия, выполняющих в (8) роль параметров, и выражается в виде произведения двух функций, зависящих отдельно от переменных x_4 и y_4 . Эти функции, как нетрудно убедиться, пропорциональны «сечениям» функций пропускания $T_1(x_1, y_1)$ и $T_3(x_3, y_3)$ при $x_1 = x_2$ и $y_3 = y_2$. Если же пропускание транспарантов T_1 и T_3 описывается выражениями (2) и (3), то такими «сечениями» являются изображения строк и столбцов матриц $[A]$ и $[C]$. Оптическая система с

откликом вида (8), полученным в предположении, что ее входной плоскостью является плоскость P_2 , относится к классу линейных пространственно-неинвариантных систем.

Примеры применения. Одно из интересных применений описанной системы — реализация спектрального анализа изображений по базису Уолша. Действительно, процесс вычисления спектра Уолша эквивалентен выполнению преобразования Адамара по формуле

$$[F] = [H][f][H],$$

где $[H]$ — матрица Адамара, а $[f]$ — матрица отсчетов анализируемого изображения [6].

Для осуществления преобразования Адамара в рассмотренной оптической системе в плоскостях P_1 и P_3 необходимо разместить транспаранты с изображениями положительных и отрицательных значений матрицы Адамара в сочетаниях $T_1^+, T_3^+; T_1^+, T_3^-; T_1^-, T_3^+; T_1^-, T_3^-$, а в плоскости P_2 — транспарант T_2 с анализируемым изображением.

Как и в [5], представление матрицы Адамара на двух транспарантах вызвано необходимостью определения знака спектральных компонент.

Распределения интенсивностей, пропорциональные элементам частных матриц $[F]^{++}$, $[F]^{+-}$, $[F]^{-+}$, $[F]^{--}$, определяются последовательно за четыре такта работы системы. Двойное уменьшение числа тактов в сравнении с общим случаем вызвано тем, что для реальных изображений матрица отсчетов является положительной. Элементы искомой матрицы $[F]$ вычисляются путем алгебраического суммирования элементов частных матриц, т. е.

$$[F] = [F]^{++} + [F]^{--} - [F]^{+-} - [F]^{-+}.$$

Реализация разложений по полутоновым функциям, например по полиномам Лежандра, производится аналогичным образом. Для этого в каждой строке транспаранта T_1 и каждом столбце транспаранта T_3 записываются соответственно функции разложения $\varphi_i(x)$ и $\varphi_j(y)$. Одно из преимуществ системы проявляется в том, что указанные функции могут быть представлены в силуэтном виде, позволяющем повысить точность анализа [4].

Рассматриваемая система может быть применена также для многоканальной обработки одномерных сигналов. В этом случае входной плоскостью системы является плоскость P_1 (или P_3). Если, например, элементами строк матрицы $[A]$ являются отсчеты N сигналов, $[B]$ — единичная, а $[C]$ — произвольная матрицы, то распределение интенсивностей на выходе системы пропорционально результату линейного интегрального преобразования этих сигналов с ядром, определяемым матрицей $[C]$. Если же вычислению подлежит квадратичная форма, используемая в качестве критерия при обнаружении или распознавании сигналов [7, 8], то $[A]$, как и ранее, содержит отсчеты сигналов, подлежащих обработке, $[B]$ является ковариационной матрицей, а $[C] = [A]^T$, где T — символ транспонирования.

Размерность матриц. Поскольку интегрирование, осуществляемое объективом 8 (см. рис. 2), основано на его фокусирующих свойствах, то при оценке разрешающей способности системы следует принимать во внимание дифракцию света, которая ограничивает размерность вычисляемых матриц (главным образом по координате Y).

Выделим в плоскости P_1 элемент разрешения с размером по оси Y , равным d , и рассмотрим изменения, которые возникают при проектировании этого элемента в плоскость P_4 . Поскольку систему между плоскостями P_1 и P_4 по координате Y можно заменить проектирующим

звеном с характерным размером импульсного отклика

$$h_L = 2\lambda f_0/L = 2\lambda s_0,$$

где f_0 — расстояние от выходного зрачка системы (плоскость P_3) до плоскости P_4 , а $s_0 = f_0/L$, то размер элемента разрешения становится равным $d + h_L$. В случае $h_L \ll d$ изменением его геометрических размеров можно пренебречь.

Если поперечный размер строки в плоскости P_3 равен δ , то размер импульсного отклика

$$h_\delta = 2\lambda f_0/\delta = 2\lambda s_0 L/\delta. \quad (9)$$

Пусть строки на транспаранте T_1 разделены непрозрачными промежутками величиной Δ . Тогда минимально допустимый размер Δ , при котором в выходной плоскости не происходит перекрытия изображений соседних строк, связан с размером импульсного отклика соотношением

$$\Delta = h_\delta. \quad (10)$$

Определим теперь допустимые размерности умножаемых матриц для заданных параметров системы L , s_0 , Δ и λ (λ — средняя длина волны используемого света). Из соотношений

$$\begin{aligned} (\Delta + d)N &= L; \\ P\delta &= L \end{aligned}$$

с учетом (9), (10) следует, что

$$P = (L/N - d)/2\lambda s_0, \quad d < L/N.$$

Это означает, что размерность матрицы $[C]$ по направлению Y связана с размерностью матрицы $[A]$ и не превышает величины $P_{\max} = L/2N\lambda s_0$. Если матрицы являются квадратными, то их предельная размерность ограничена сверху значением $N_{\text{пр}} = 0,7\sqrt{L/\lambda s_0}$, которое для параметров системы $L = 50$ мм, $s_0 = 2$ и $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм составляет величину порядка 140.

Таким образом, несмотря на то что дифракционные явления ограничивают размерность умножаемых матриц по одной из координат, допустимые их размерности достаточно велики. Размерность умножаемых матриц по другой координате ограничивается разрешающей способностью проектирующих сферических объективов.

Результаты экспериментов. С целью качественной иллюстрации возможностей предложенной системы проведены эксперименты по умножению матриц, а также эксперименты по разложению простейших тестовых изображений по функциям Уолша и полиномам Лежандра.

Результаты умножения матриц с элементами, принимающими значение 1 и 0, приведены на рис. 3, где показаны исходные транспаранты T_1 , T_2 , T_3 с изображениями матриц $[A]$, $[B]$, $[C]$ и картины распределения интенсивностей света в выходной плоскости системы для случаев:

- а) умножения треугольной (верхней левой) матрицы на две единичные (с ортогональным расположением диагональных элементов);
- б) умножения треугольной (верхней левой) матрицы на единичную и треугольную (верхнюю правую);
- в) умножения матрицы «шахматного» типа на единичную и треугольную (верхнюю левую).

Случаи а, б соответствуют размерности матриц 8×8 , случай в — 16×16 .

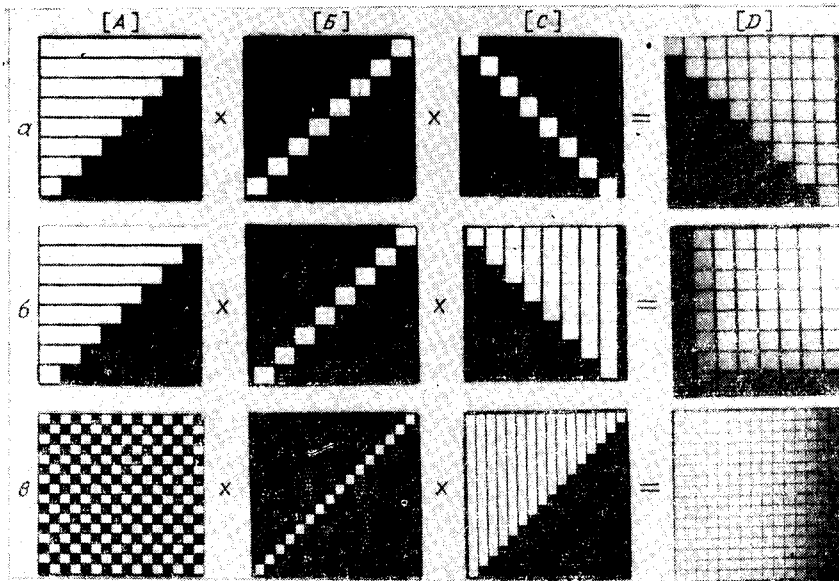


Рис. 3.

Результаты спектрального анализа тестовых изображений приведены на рис. 4. Разложение в случаях *a*, *б* производилось по положительным матрицам Адамара, а в случае *в* — по матрицам, составленным из полиномов Лежандра со смещением. На рисунке показан вид транспарантов T_1 , T_3 с изображениями матриц $[H]^+$, $[H]^+$ и $[L]$, $[L]^T$. Выходные полутоновые распределения интенсивности света пропорциональны значениям элементов частной матрицы $[F]^{++}$, причем верхнее из них (случай *a*) соответствует спектру Уолша рабочего квадратного

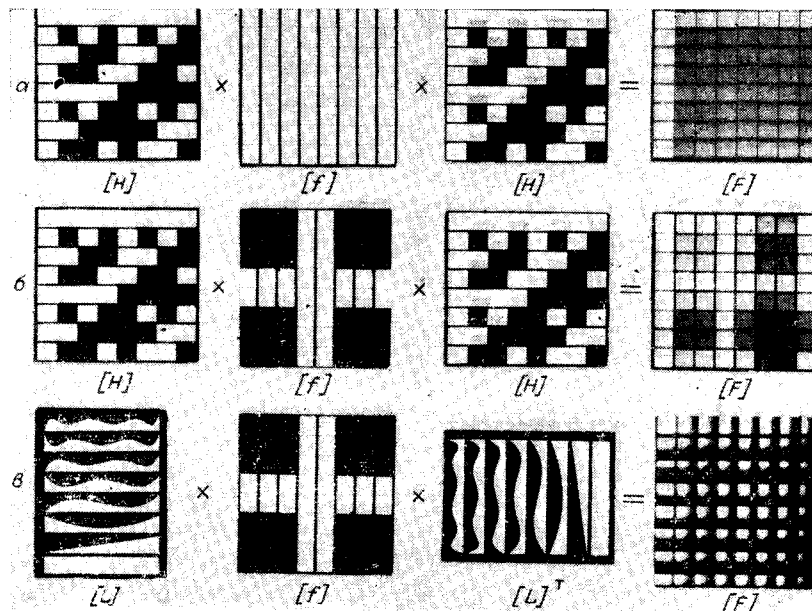


Рис. 4.

поля системы, а два нижних (случай б, в) — спектрам Уолша и Лежандра изображения «креста».

Погрешность матричных преобразований, выполняемых в системе аналоговым способом, зависит главным образом от качества применяемой цилиндрической оптики, точности задания и размерности исходных матриц на транспарантах, неравномерности светимости источника и точности фотоэлектрического считывания. Эти факторы должны приниматься во внимание при разработке оптической системы конкретного назначения.

В заключение отметим, что предложенная система позволяет существенно расширить класс интегральных преобразований, реализуемый некогерентными оптическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Heinz, I. O. Artman, S. M. Lee. Matrix Multiplication by Optical Methods.—“Appl. Opt.”, 1970, v. 9, № 9.
2. D. P. Jablonowski, R. A. Heinz, I. O. Artman. Matrix Multiplication by Optical Methods. Experimental Verification.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 1.
3. Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб. Умножение матриц оптическим методом.— «Автометрия», 1972, № 6.
4. О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Обобщенный спектральный анализ изображений с использованием силуэтных фильтров.— «Автометрия», 1973, № 5.
5. Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— «Автометрия», 1974, № 6, № 1.
6. Прайт, Кейн, Эндрюс. Кодирование изображений посредством преобразования Адамара.— «ТИИЭР», 1969, т. 57.
7. Теория связи. Перевод с англ. под ред. Б. Р. Левина. М., «Связь», 1972.
8. Н. Нильсон. Обучающиеся машины. М., «Мир», 1967.

Поступила в редакцию 15 января 1975 г.

УДК 621.391.156

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, Б. И. СПЕКТОР

(Новосибирск)

ОПТИЧЕСКОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Линейность оптических систем обработки изображений существенно ограничивает их функциональные возможности. В случаях, когда алгоритм обработки требует осуществления нелинейных преобразований, зачастую прибегают к поэлементному сканированию изображения и вводу в АВМ или ЦВМ [1]. Известны способы параллельного нелинейного преобразования, основанные на применении нелинейных характеристик сред [2, 3]. Недостатками последних являются низкое быстродействие; трудности, связанные с необходимостью смены вида преобразования; невозможность оперативного управления параметрами преобразования и т. п.

В настоящем сообщении описан метод параллельного нелинейного преобразования изображений в линейной оптической системе, основан-