

В. А. ЗУБОВ, А. В. КРАЙСКИЙ, Т. В. МИРОНОВА,
Т. Т. СУЛТАНОВ, А. Г. ХЛЕБНИКОВ

(Москва)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА СЛУЧАЙНЫХ БИНАРНЫХ ТРАНСПАРАНТОВ

В работе рассматривается оптико-электронная система корреляционной обработки двумерной оптической информации, заданной в виде бинарных транспарантов. Экспериментальная техника представляет собой дальнейшее развитие системы оптико-электронной обработки, базирующейся на применении интерферометра Майкельсона в оптической части и платы параллельного обмена И-2 при связи экспериментальной установки с ЭВМ [1, 2].

В схеме оптической обработки использован модифицированный интерферометр Маха — Цендера, в каналах которого располагаются транспаранты с исследуемой информацией и с изображением опознаваемого объекта [3]. На выходе интерферометра фотоэлектрически регистрируется интегральный интерференционный сигнал от полей, сформированных при дифракции света на структуре транспарантов. Сигнал интерференции регистрируется при относительном смещении транспарантов. При совпадении участков изображений с транспаранта-фильтра и с обрабатываемой картины возникает импульс, соответствующий функции корреляции. Для управления экспериментальной установкой и электронной обработки информации использована двухуровневая система ЭВМ («Электроника 60» и PDP-11/70) [4]. Для связи с экспериментальной установкой использована старшая область адресов (160 000 — 177 776) оперативного запоминающего устройства ЭВМ в качестве адресов внешних устройств при обращении к ним через общую шину ЭВМ. Блок-схема электронной части системы обработки представлена на рис. 1. ЭВМ «Электроника 60» использована в минимальной конфигурации, содержащей центральный процессор (ЦП) и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) емкостью 28 К. Для связи с ЭВМ PDP-11/70 и с терминалом (ТЕРМ) использованы канальное и терминальное устройства последовательной передачи данных (КУППД и ТУППД) [5]. В качестве терминала применен дисплей 15-ИЭ-00-013-01. Связь общей шины (ОШ) ЭВМ «Электроника 60» с блоком управления экспериментальной установкой осуществляется через контроллер (К). Все блоки управления экспериментом взаимодействуют с контроллером через общую шину связи — шину крейта (ШК), содержащую 25 линий, включая 8 адресных линий и 8 — для передачи данных. Эта группа блоков содержит: дисплей магистрали (ДМ), дающий возможность контролировать сигналы отдельных линий шины крейта; цифроаналоговый преобразователь (ЦАП₁), предназначенный для выработки аналоговых сигналов, управляющих пьезокерамикой через усилитель (УПК); модуль вольтметра (МВ), обеспечивающий синхронизацию работы вольтметра и прием информации с цифрового вольтметра (ЦВ) типа В-7-21 и играющий роль аналого-цифрового преобразователя; два цифроаналоговых преобразователя ЦАП₂, преобразующие полученную и обработанную информацию для графического представления на двухкоординатном самописце (САМ); модуль ключей (МК), позволяющий работать с устройствами в ключевом режиме, в частности выполняющий включение затворов в каналах интерферометра; модуль шаговых двигателей (МШД), управляющий работой двух шаговых моторов.

Все указанные модули собраны в одном крейте типа «Винши». Питание крейта осуществлялось от блока питания ЭВМ «Электроника 60».

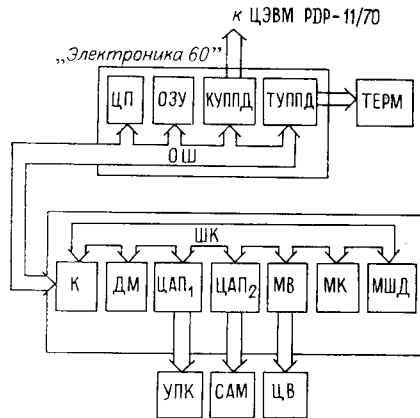


Рис. 1. Блок-схема электронной части системы обработки информации

Дополнительно были подведены силовые и высоковольтные линии, используемые для питания шаговых моторов и пьезокерамики.

В качестве объекта исследования использовались бинарные случайные транспаранты, которые формировались с помощью ЭВМ по программе случайных чисел [6, 7]. Для транспарантов такого типа легко выполняются расчеты. Примем, что амплитудная прозрачность темных элементов транспаранта

равна T , а прозрачных — L . Вероятность заполнения транспаранта-фильтра прозрачными элементами — p_1 , а обрабатываемого транспаранта — p_2 . Так как обрабатываемая информация помимо изображения объекта может содержать другие изображения и помехи, то имеет место $p_2 \geq p_1$. Кроме того, все прозрачные элементы транспаранта-фильтра обязательно присутствуют на обрабатываемом транспаранте. Для транспарантов, сформированных с помощью ЭВМ, учитывалось отношение площадей темной сетки, существующей между элементами, и всех бинарных элементов β/α , а также полное число элементов N .

При произвольном положении транспарантов l прозрачных элементов транспаранта-фильтра совпадут с m прозрачными и с $(l - m)$ темными элементами транспаранта с обрабатываемой информацией, а $(N - l)$ темных элементов транспаранта-фильтра совпадут с k прозрачными и с $[N - (l + k)]$ темными элементами транспаранта с обрабатываемой информацией. Составляющая выходного сигнала, обусловленная интерференцией полей, в данном случае дает фоновый сигнал и описывается выражением

$$I_{\text{фон}}(x) = s\{\alpha[m2T_1T_2 + (l - m)2T_1L_2 + k2L_1T_2 + (N - l - k)2L_1L_2] + \beta N2L_1L_2\}, \quad (1)$$

где s характеризует чувствительность приемника излучения; T_1, T_2, L_1, L_2 описывают амплитудное пропускание прозрачных и темных элементов первого и второго транспарантов, используемых при данных измерениях; составляющая $\beta N2L_1L_2$ учитывает действие непрозрачной сетки для машинных транспарантов. Максимальный корреляционный сигнал соответствует тому, что l прозрачных элементов транспаранта-фильтра сочетаются с прозрачными элементами транспаранта с обрабатываемой информацией, а $(N - l)$ темных элементов совпадают с $(n - l)$ прозрачными и с $(N - n)$ темными элементами. Это дает сигнал, который описывается выражением

$$I_{\text{кор.мах}} = s\{\alpha[l2T_1T_2 + (n - l)2L_1T_2 + (N - n)2L_1L_2] + \beta N2L_1L_2\}. \quad (2)$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для сигналов, создаваемых при работе только одного или только другого канала:

$$\begin{aligned} I_1 &= s\{\alpha[lT_1T_1 + (N - l)L_1L_1] + \beta NL_1L_1\}; \\ I_2 &= s\{\alpha[nT_2T_2 + (N - n)L_2L_2] + \beta NL_2L_2\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $n = m + k$ и $N - n = N - m - k$.

Схема обработки информации приводила к получению нормированных значений фонового сигнала и функции корреляции, даваемых выражениями [8]

$$\begin{aligned} \langle I_{\text{норм.фон}} \rangle &= \langle I_{\text{фон}} \rangle / 2\sqrt{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}; \\ \langle I_{\text{норм.кор.мах}} \rangle &= \langle I_{\text{кор.мах}} \rangle / 2\sqrt{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}, \end{aligned} \quad (4)$$

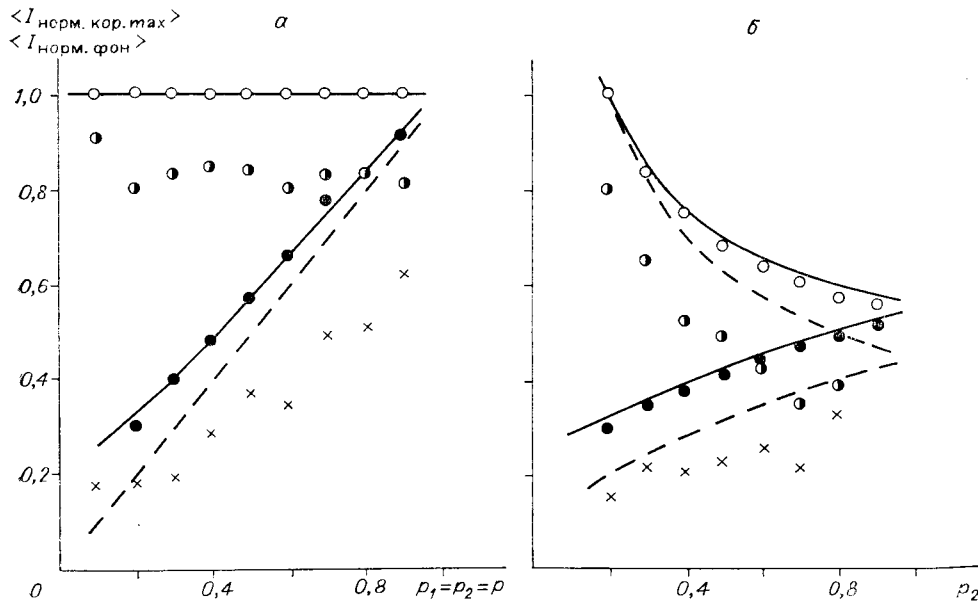


Рис. 2. Зависимость $\langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle$ и $\langle I_{\text{норм. фон}} \rangle$ от вероятности заполнения транспарантов прозрачными элементами:
 а — для $p_1 = p_2 = p$, б — для $p_1 = 0,2$; \circ, \times — экспериментальные значения; \circ, \bullet — расчетные значения для конкретных транспарантов; сплошная линия — расчет для усредненных характеристик транспарантов; штриховая линия — для идеальных транспарантов

где угловые скобки обозначают усреднение, которое выполняется для выражений (1)–(3) с учетом средних значений использованных величин:

$$\begin{aligned} \langle l \rangle &= p_1 N, & \langle n \rangle &= p_2 N, \\ \langle m \rangle &= p_1 p_2 N, & \langle k \rangle &= (1 - p_1) p_2 N. \end{aligned}$$

Выполнялось сопоставление экспериментальных результатов, полученных для транспарантов с одинаковыми и разными заполнениями прозрачными элементами, с расчетом для величин $\langle I_{\text{норм. фон}} \rangle$, $\langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle$, $I_{\text{норм. 0}} = \langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle - \langle I_{\text{норм. фон}} \rangle$. Расчет выполнялся в соответствии с соотношениями (4) для конкретных вероятностей заполнения прозрачными элементами и конкретных величин амплитудного пропускания T_1, L_1, T_2, L_2 и для случая идеальных характеристик транспарантов $T_1 = T_2 = 1, L_1 = L_2 = 0$. В последнем варианте расчетные соотношения имеют простой вид

$$\begin{aligned} \langle I_{\text{норм. фон}} \rangle &= 2\alpha p_1 p_2 / (2\sqrt{\alpha p_1 \alpha p_2}) = \sqrt{p_1 p_2}; \\ \langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle &= 2\alpha p_1 / (2\sqrt{\alpha p_1 \alpha p_2}) = \sqrt{p_1 / p_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты эксперимента и расчета представлены на рис. 2 и 3. На рис. 3 даны также величины абсолютных погрешностей, рассчитанных в соответствии с выражением

$$I_{\text{норм. 0}} = (\langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle - \langle I_{\text{норм. фон}} \rangle) 2 \left[\Delta_{\text{фон}}^2 + \frac{\langle I_{\text{фон}} \rangle^2 \Delta_2^2}{4 \langle I_2 \rangle^2} \right]^{1/2} / I_{\text{норм. 0}}$$

В этом выражении величины $\langle I_{\text{норм. кор. макс}} \rangle$, $\langle I_{\text{норм. фон}} \rangle$ и $I_{\text{норм. 0}}$ рассчитываются в соответствии с (4) и с учетом (1)–(3), $\langle I_{\text{фон}} \rangle$ и $\langle I_2 \rangle$ — (1) и (3). Погрешности $\Delta_{\text{фон}}^2$ и Δ_2^2 отыскиваются в соответствии с тем, что для транспаранта с обрабатываемой информацией при его смещении меняется число прозрачных элементов в рабочей области коррелятора. Расчет для

$$\Delta_{\text{фон}}^2 = \langle I_{\text{фон}}^2 \rangle - \langle I_{\text{фон}} \rangle^2 \quad \text{и} \quad \Delta_2^2 = \langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2$$

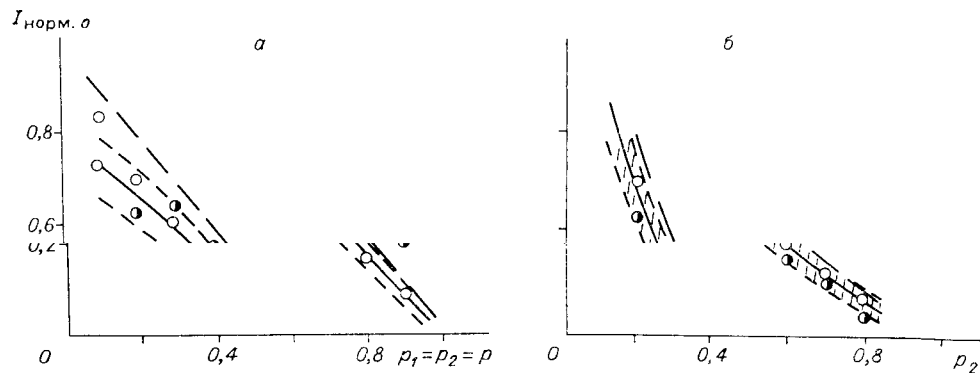


Рис. 3. Зависимость $I_{\text{норм.0}}$ от вероятности заполнения транспарантов прозрачными элементами:

a — для $p_1 = p_2 = p$, *б* — для $p_1 = 0,2$; ● — экспериментальные значения; ○ — расчетные значения для конкретных транспарантов; сплошная линия — расчет для усредненных характеристик транспарантов (указана погрешность); штриховая линия — для идеальных транспарантов

проводится в соответствии с (1) и (3) и соотношениями, выполняющимися для биномиального распределения элементов транспаранта:

$$\begin{aligned}\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 &= p_1 p_2 (1 - p_2) N; \\ \langle k^2 \rangle - \langle k \rangle^2 &= (1 - p_1) p_2 (1 - p_2) N; \\ \langle l^2 \rangle - \langle l \rangle^2 &= p_1^2 N^2.\end{aligned}$$

Полученные результаты показывают, что разработанная схема взаимодействия ЭВМ и экспериментальной установки достаточно эффективна (позволяет осуществлять взаимодействие со многими модулями), проста в изготовлении и наладке (стандартное обращение через контроллер ко всем модулям) и имеет низкую стоимость (модули собраны на микросхемах серии 155 и в общей сложности содержат не более 150 микросхем).

Модельный подход, развитый для бинарных случайных транспарантов, хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Это позволяет с его помощью моделировать работу корреляторов оптического диапазона и режимов обработки информации при варьировании условий ее представления (оптическая плотность транспарантов, соотношение полезной информации и помех и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубов В. А., Крайский А. В., Султанов Т. Т., Хлебников А. Г. Коррелятор со схемой модифицированного интерферометра Майкельсона с управлением от ЭВМ. — М., 1983. — (Препринт/АН СССР, Физ. ин-т; 248).
2. Зубов В. А., Крайский А. В., Султанов Т. Т., Хлебников А. Г. Коррелятор на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с управлением от ЭВМ // Автоматрия. — 1984. — № 2.
3. Зубов В. А., Крайский А. В., Султанов Т. Т. Обработка оптической информации с использованием схемы двухлучевого интерферометра // Голографическая обработка информации с использованием нестационарных полей. (Труды ФИАН, т. 131). — М.: Наука, 1982.
4. Баринов А. С., Зубов В. А. К вопросу о создании машинной сети для автоматизации научных исследований. — М., 1984. — (Препринт/АН СССР, Физ. ин-т; 40).
5. Алешкин М. Г., Асейкин В. С., Баринов А. С., Грабенко В. В. Создание линий связи между ЭВМ «Электроника 60» и ЭВМ ПДП-11/70 // Методы и средства автома-

Поступила в редакцию 17 апреля 1986 г.

УДК 681.3 : 621.3

К. И. КУЧЕРЕНКО, Е. Ф. ОЧИН
(Ленинград)

ПРОЦЕССОРЫ ДВУМЕРНОЙ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОРТИРУЮЩИХ СЕТЕЙ

Широкое применение в цифровой обработке изображений получила медианная фильтрация, используемая для подавления импульсных помех, выделения объектов на изображениях, многоспектральной классификации изображений [1—4]. Двумерная медианная фильтрация дискретизованного изображения $\left\{ 0 \leq D_{i,j} < 1 \mid \begin{matrix} i = \overline{1, I} \\ j = \overline{1, J} \end{matrix} \right\}$, представленного в виде матрицы размером $I \times J$ элементов и квантованного на 2^q уровней, определяется следующим образом:

$$D'_{i,j} = \text{med} \left\{ D_{i+m,j+n} \mid \begin{matrix} m = \overline{-M, M} \\ n = \overline{-N, N} \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где оператор med обозначает некоторую процедуру поиска элемента последовательности $\left\{ D_{i+m,j+n} \mid \begin{matrix} m = \overline{-M, M} \\ n = \overline{-N, N} \end{matrix} \right\}$ длиной $L = (2M + 1) \times (2N + 1)$, для которого существует $(L - 1)/2$ элементов, меньших или равных ему по величине, и $(L - 1)/2$ элементов, больших или равных ему по величине. Высокая скорость обработки изображений (в темпе поступления отсчетов — элементов — изображений) достигается при построении процессоров двумерной медианной фильтрации (медианных фильтров) на основе сортирующих сетей [5—10].

Для реализации медианного фильтра в виде регулярной сортирующей сети на основе четно-нечетной сортировки с транспозициями [8—10] требуется $L(L - 1)/2$ сортирующих элементов (СЭ). Например, для построения медианных фильтров с размерами апертуры 3×3 , 5×5 , 7×7 потребуется соответственно 36, 300, 1176 СЭ. Регулярные структуры сортирующих сетей, как правило, используются в фильтрах, выполненных по БИС технологии [8, 9].

Для построения медианного фильтра на основе сортировки Бэтчера с четно-нечетным слиянием [5, 11, 12] требуемое число сортирующих элементов $C'(L)$ определяется следующим образом:

$$C'(L) = C(t) + C(t - 1) + C'(t, t - 1), \quad (2)$$

где $C(t)$, $C(t - 1)$ — число СЭ, необходимых для сортировки t и $(t - 1)$ элементов изображения соответственно; $C'(t, t - 1)$ — число СЭ, требуе-