

## ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.327.68

А. А. ВЕРБОВЕЦКИЙ, Е. А. ЗИМОГЛЯДОВА  
(Москва)

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ АССОЦИАТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Введение.** Одним из перспективных направлений создания ассоциативных ЗУ для вычислительных систем, появившихся в последние годы, является построение оперативных ассоциативно-адресных ЗУ большой емкости на принципах оптоэлектроники [1, 2]. Однако в настоящее время наиболее близки к реализации ассоциативные запоминающие устройства (АЗУ) с двухуровневой организацией [3, 4]. В этом случае первый уровень АЗУ представляет собой адресное ЗУ, а второй — устройство, осуществляющее ассоциативный поиск в ЗУ первого уровня.

В данной работе рассмотрена возможность построения двухуровневых устройств, когда в качестве первого уровня могут быть использованы различные типы оперативных адресных ЗУ (например, электронные), базы данных и т. д., т. е. уже хорошо освоенные промышленностью, а в качестве второго уровня — многоканальные ассоциативные оптические корреляторы (МАОК), описанные ниже, в которых многоканальный ассоциативный поиск информации осуществляется аппаратными средствами оптики с присущими ей преимуществами [4, 5].

**1. Оптические системы многоканальных ассоциативных оптических корреляторов.** Математически задача выявления совпадения в странице ассоциативных признаков с множеством признаков опроса сводится к умножению матрицы ассоциативных признаков, представленных в прямом парафазном коде, на матрицу признаков опроса в обратном парафазном коде [6].

Оптическая схема многоканального ассоциативного оптического коррелятора, реализующая такую операцию, приведена на рис. 1. С целью обеспечения высокой помехозащищенности местонахождение искомым признаков в данной схеме определяется не по отсутствию светового сигнала на некотором фотоприемнике фотоприемной матрицы ассоциативного поиска (ФМАП), а по переключению светового сигнала с одного фотоприемника на другой. (Фотоприемники регистрируют в этом случае парафазный оптический сигнал и называются в дальнейшем парафазными фотоприемниками [2].) Низкая надежность определения отсутствия сигнала на фотоприемнике, регистрирующем в общем случае суммарные дискретные световые сигналы в большом динамическом диапазоне, связана с тем, что на фотоприемник поступает и суммарная помеха, которая может превысить сигнал, равный единице.

Для осуществления парафазной индикации к каждому парафазному разряду ассоциативного признака и, например, к младшему парафазному разряду каждого признака опроса, которые представлены в коде Рида — Маллера, добавляют опорные единицы в простом коде, а к

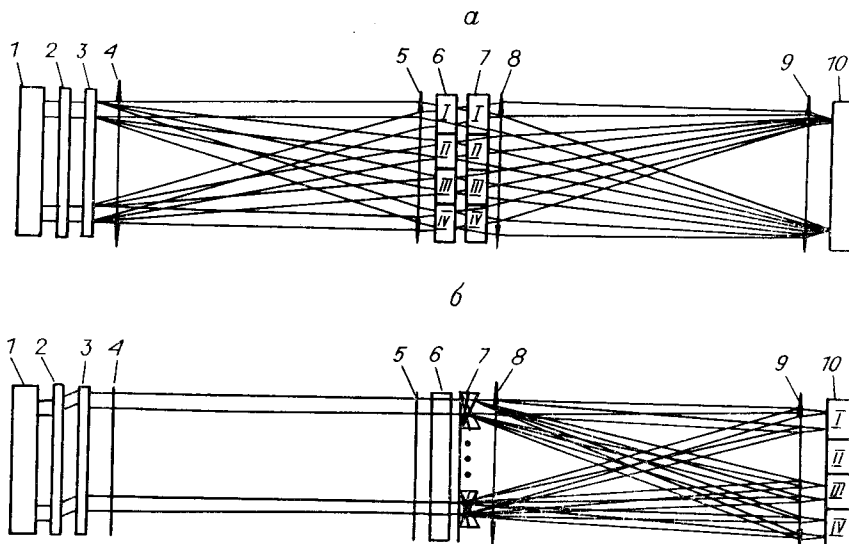


Рис. 1. Схема многоканального ассоциативного оптического коррелятора (а и б — ортогональные проекции):

1 — матрица излучательных элементов; 2 — дифракционная решетка; 3 — матрица голографических расщепителей; 4, 5 — цилиндрические объективы; 6 — управляемый транспарант ассоциативного поиска; 7 — матрица клиньев; 8, 9 — объективы; 10 — фотоприемная матрица ассоциативного поиска

остальным парафазным разрядам признаков опроса — соответственно опорные нули также в простом двоичном коде [2, 7]. Признаки опроса умножают на ассоциативные признаки с добавленными опорными разрядами так, чтобы опорные знаки этих признаков перемножались между собой, отдельно суммируют разряды каждого произведения признака опроса на ассоциативный признак и разряды кода произведения опорных знаков, соответствующих этим признакам, пространственно разделяют полученные суммы, которые совместно составляют парафазный двоичный знак, определяющий степень совпадения ассоциативного признака с признаком опроса.

При таком способе кодирования признаки представлены в парафазном коде на всех этапах ассоциативного поиска, что обеспечивает высокую надежность поиска, так как помехи присутствуют на обоих плечах парафазного фотоприемника и при считывании компенсируют друг друга.

В данной схеме коррелятора (см. рис. 1) признаки опроса отображаются на матрице излучательных элементов МИЭ 1 (например, матрице полупроводниковых лазеров), а ассоциативные признаки информации — на управляемом транспаранте ассоциативного поиска УТАП 6. Для одновременного и независимого проецирования изображений признаков опроса с МИЭ 1 на все ассоциативные признаки, отображенные на УТАП 6, используется проекционная система, состоящая из дифракционной решетки 2, матрицы голографических расщепителей 3 и двух цилиндрических объективов 4, 5. Дифракционная решетка, обеспечивая направление световых пучков с МИЭ на матрицу голографических расщепителей под необходимым для восстановления голограмм углом, позволяет разместить матрицы в непосредственной близости от дифракционной решетки параллельно друг другу и обеспечить в них одинаковые расстояния между элементами. За счет восстановления с голографического расщепителя световых пучков, сфокусированных на ячейках УТАП, достигается концентрация световой энергии МИЭ на ячейках УТАП.

Возможны и другие варианты ввода признаков опроса в МАОК, например, с помощью УТ, освещаемого коллимированным лазерным пучком, или при одновременном использовании вместо голографических

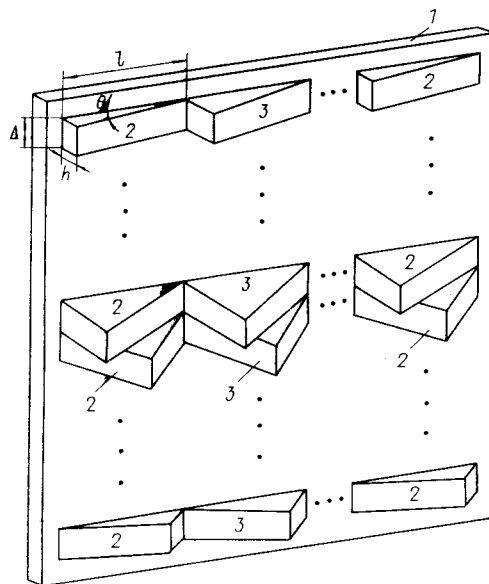


Рис. 2. Структурная схема матрицы клиньев:

1 — подложка; 2, 3 — соответственно признаковые и опорные клинья

элементов 2, 3 цилиндрического линзового растра, или в случае ввода признаков опроса непосредственно от оптоэлектронного ЗУ в виде оптического изображения с помощью оптически управляемого транспаранта.

Разделение в пространстве световых пучков, соответствующих разным ассоциативным признакам, а также признаковым и опорным пучкам одного слова, осуществляется с помощью матрицы клиньев (рис. 2). Признаковые и опорные клинья в каждой строке отличаются преломляющими углами, при этом углы для каждого типа клиньев постоянны в строке. Преломляющие углы клиньев линейных растров ступенчато изменяются от крайних строк по направлению к центру матрицы, по обе стороны которого линейные растры клиньев одинаковы и развернуты относительно друг друга на  $180^\circ$  для уменьшения диапазона преломляющих углов клиньев и распределения световых пучков за матрицей клиньев симметрично относительно единой оптической оси коррелятора.

Оценим необходимые для достижения максимального объема обрабатываемой коррелятором информации оптимальные параметры клина, имеющего в матрице наибольший преломляющий угол  $\Theta$ .

Введем следующие обозначения:  $l$  — длина клина;  $h$  — высота основания клина;  $d$  — диаметр светового пучка;  $\Delta$  — толщина клина, равная шагу расположения светоклапанных ячеек в УТ 6;  $F$  — фокусное расстояние объектива 4;  $L$  — сторона УТ 6;  $n$  — показатель преломления клина (см. рис. 2).

Из условия, что световой пучок не должен выходить за пределы задней преломляющей поверхности клина, следует

$$h = F(\Delta - d)n/2L. \quad (1)$$

Преломляющий угол  $\Theta$  клина связан с углом  $\varphi$  отклонения пучка формулой

$$(n - 1)\text{tg } \Theta = \text{tg } \varphi. \quad (2)$$

Учитывая, что  $\text{tg } \Theta = h/l$  и  $\text{tg } \varphi = L/2F$ , из (2) получим

$$l = 2(n - 1)Fh/L. \quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), найдем

$$l = n(n - 1)F^2(\Delta - d)/L^2. \quad (4)$$

Положим для примера, что  $n = 1,5$ ,  $F^2/L^2 = 4$  и  $d = \Delta/2$ , тогда

$$l = 1,5\Delta. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при максимальном объеме информации, обрабатываемой коррелятором, длина клина с наибольшим преломляющим углом в матрице клиньев должна быть равна шагу расположения светоклапанных ячеек в УТ 6.

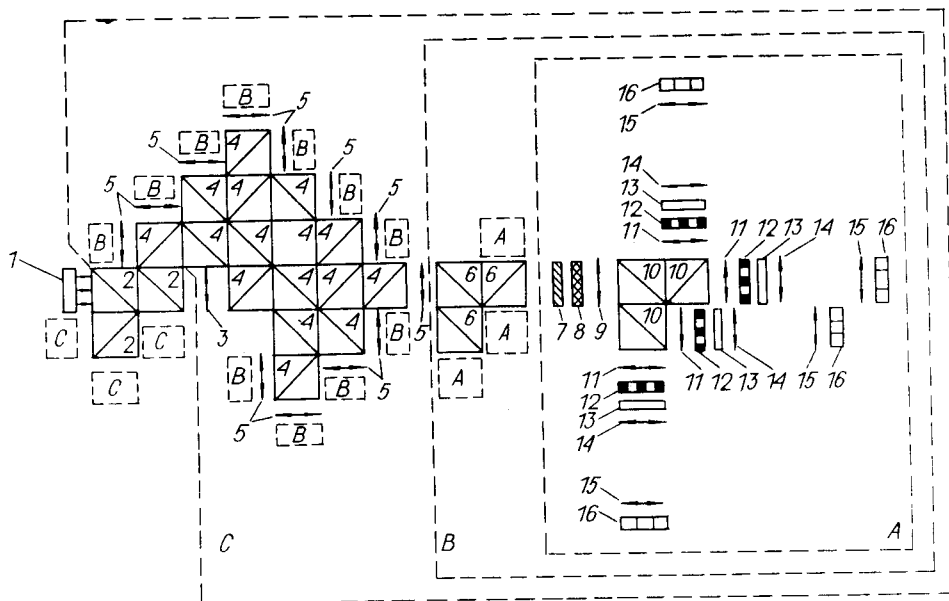


Рис. 3. Схема МАОК с поликубическими мультипликаторами изображения:  
 1 — МИЭ; 2, 4, 6, 10 — поликубические мультипликаторы; 3, 5, 14, 15 — объективы; 7 — дифракционная решетка; 8 — матрица голографических расщепителей; 9, 11 — цилиндрические объективы; 12 — УТАП; 13 — матрица клиньев; 16 — ФМАП

Суммирование световых пучков одного направления производится объективом 8 таким образом, чтобы соответствующие признаковые и опорные пучки одного слова попадали на разные элементы одного парафазного фотоприемника. Координаты парафазного фотоприемника в ФМ, на котором сигнал опорного пучка больше признакового, определяют номера признака опроса и ассоциативного признака в соответствующих страницах, по которым произошло совпадение [2].

Можно значительно увеличить число ассоциативных признаков, по которым осуществляется поиск, и тем самым увеличить число признаков, одновременно обрабатываемых вышеописанным МАОК, определяемое как произведение количества признаков опроса на ассоциативные признаки, если при построении коррелятора использовать методы мультипликации световых пучков. Такая схема МАОК показана на рис. 3. Объективы 3, 5 образуют телескопические системы, переносящие изображения страницы признаков опроса, размноженной поликубическими мультипликаторами 2, 4, 6, с МИЭ на дифракционные решетки 7. Поликубический мультипликатор 10 осуществляет дополнительное размножение страниц признаков опроса. Таким образом, коэффициент мультипликации в данной схеме равен произведению коэффициентов мультипликации мультипликаторов 2, 4, 6, 10.

Такой метод мультиплицирования позволяет достигнуть больших коэффициентов мультипликации страниц признаков опроса без снижения (по сравнению с предыдущей схемой МАОК) числа ассоциативных признаков, отображенных на каждом УТАП 12, т. е. при большой светосиле объективов 3, 5. Например, при светосиле объективов 3, 5, равной 2, коэффициент мультипликации схемы может достигать  $\sim 10^3$ , и, следовательно, во столько же раз увеличится число одновременно обрабатываемых признаков данным МАОК (см. рис. 3) по сравнению с предыдущим (см. рис. 1).

**2. Основные параметры корреляторов.** Число одновременно обрабатываемых признаков и физические размеры коррелятора оценим, исходя из критерия разрешения Рэлея при условии, что физические размеры МИЭ, УТАП и ФМАП равны.

Положим, что

$$\Delta_{\phi} = 3(1,22\lambda F/\delta_{\text{УТ}}), \quad (6)$$

где  $\Delta_{\phi}$  — шаг расположения элементов в ФМ;  $\lambda$  — длина волны света;  $F$  и  $D$  — соответственно фокусное расстояние и диаметр объектива  $\delta$  (см. рис. 1);  $\delta_{\text{УТ}}$  — диаметр светоклапанного элемента УТ.

Введем следующие обозначения: количество излучательных элементов в МИЭ  $n \times n$ , количество светоклапанных элементов в УТАП  $n \times m$ ; тогда число признаков  $C$ , одновременно обрабатываемых коррелятором (см. рис. 1), определится из выражения

$$C = n \times m, \quad (7)$$

а физический объем устройства — из выражения

$$V = 2F \times n\Delta_{\phi} \times m\Delta_{\phi}. \quad (8)$$

Например, при числе признаков  $C = 2,5 \cdot 10^3$  слов и  $\lambda = 0,63$  мкм габаритные размеры коррелятора будут примерно  $108 \times 35 \times 35$  мм. Такие физические размеры МАОК хорошо вписываются в габаритные размеры современных ЭВМ.

*Быстродействие МАОК* можно оценить из энергетических соображений временем  $\tau$  срабатывания фотоприемной матрицы

$$\tau = E/P_{\phi}, \quad (9)$$

где  $E$  — чувствительность фотоприемников;  $P_{\phi}$  — световая мощность, приходящаяся на один фотоприемник при несовпадении в одном парафазном двоичном знаке признака опроса с ассоциативным признаком.

Введем следующие обозначения:  $P_{\pi}$  — световая мощность излучательного элемента;  $\eta_{\text{д}}$  — эффективность дифракционной решетки;  $\eta_{\text{р}}$  — дифракционная эффективность голографического расщепителя;  $K_{\text{УТ}}$  — оптическое пропускание УТАП;  $K_{\text{о}}$  — пропускание оптических элементов схемы.

Тогда формула (9) для расчета быстродействия МАОК по схеме рис. 1 примет вид

$$\tau = Em/P_{\pi}\eta_{\text{д}}\eta_{\text{р}}K_{\text{УТ}}K_{\text{о}}. \quad (10)$$

Полагая  $E = 10^{-14}$  Дж,  $P_{\pi} = 1$  мВт,  $\eta_{\text{д}} = 0,5$ ,  $\eta_{\text{р}} = 0,4$ ,  $K_{\text{УТ}} = 0,25$ ,  $K_{\text{о}} = 0,9$ , получим

$$\tau \approx 10_m^{-9}. \quad (11)$$

Например, при  $m = 50$  слов из (11) найдем  $\tau = 50$  нс, т. е. быстродействие МАОК хорошо согласуется с быстродействием электронных схем ЭВМ.

Однако необходимо отметить, что такое быстродействие МАОК требует соответствующих скоростей ввода признаков в МАОК с помощью МИЭ и УТ. МИЭ, выполненные в виде матрицы полупроводниковых лазеров, могут обеспечить такое быстродействие, а устройства ввода на основе УТ нуждаются в существенном улучшении своих характеристик. В схеме МАОК с мультипликацией признаков (см. рис. 3) при числе одновременно обрабатываемых признаков  $\sim 10^7$  слов время определения ассоциативного совпадения будет составлять  $\sim 100$  мкс. Корреляторы с такими параметрами более близки к реализации.

*Помехозащищенность коррелятора.* Сравним различные методы кодирования признаков в МАОК, для чего введем следующие обозначения: отношение сигнал/помеха соответственно после УТ  $\rho_{\text{УТ}}$ , на ФМ  $\rho_{\phi}$ , число парафазных информационных двоичных знаков в признаке  $s$ , число дополнительных разрядов при корреляционном кодировании  $r$ , минимальное кодовое расстояние  $d_{\text{мин}}$ , число опорных (простых) разрядов  $k$ ;  $e$  и  $e_{\text{оп}}$  — соответственно признаковый и опорный сигналы за одной ячейкой УТ,  $e_{\text{п}}$  — помеха за одной ячейкой УТ.

$n \times n$	№ п/п	Тип кодирования	Данные					
			$\rho_{\text{УТ}}$ или сигнал	$s$	$r$	$k$	$d_{\text{min}}$	$\rho_{\text{Ф}}$ или $E_{\text{Ф}}$
32×32	1	Парафазное	20	16	—	—	—	2
	2	Парафазное + код Хэмминга	20	11	5	—	4	6
	3	Парафазное + опорные разряды	$11e_{\text{П}}$	11	—	10	—	$e_{\text{П}} - e_{\text{оп}}$
	4	Парафазное + код Рида — Маллера + опорные разряды	$11e_{\text{П}}$	10	1	10	2	$e_{\text{П}} - e$
50×50	1	Парафазное	20	25	—	—	—	1,7
	2	Парафазное + код Хэмминга	20	19	6	—	4	4
	3	Парафазное + опорные разряды	$17e_{\text{П}}$	17	—	16	—	$e_{\text{П}} - e_{\text{оп}}$
	4	Парафазное + код Рида — Маллера + опорные разряды	$17e_{\text{П}}$	16	1	16	2	$e_{\text{П}} - e$
100×100	1	Парафазное	20	50	—	—	—	1,3
	2	Парафазное + код Хэмминга	20	43	7	—	4	2
	3	Парафазное + опорные разряды	$34e_{\text{П}}$	34	—	32	—	$2e_{\text{П}} - e_{\text{оп}}$
	4	Парафазное + код Рида — Маллера + опорные разряды	$34e_{\text{П}}$	33	1	32	2	$2e_{\text{П}} - e$

Если индикация совпадения признаков осуществляется в отсутствие светового сигнала на фотоприемнике, то для несовпадения в одном разряде признаков  $\rho_{\text{Ф}} = [d_{\text{min}}e + (s-1)e_{\text{П}}]/se_{\text{П}}$ . Учитывая, что  $\rho_{\text{УТ}} = e/e_{\text{П}}$ , получим  $\rho_{\text{Ф}} = 1 + (d_{\text{min}}\rho_{\text{УТ}} - 1)/s$ . При наличии совпадения по парафазному оптическому сигналу фотоприемники регистрируют разностный сигнал [2, 7]:  $E_{\text{Ф}} \geq e - e_{\text{оп}} + e_{\text{П}}(s-k)$ , если  $e_{\text{оп}} = e$ , то  $E_{\text{Ф}} \geq e(d_{\text{min}} - 1) + e_{\text{П}}(s+r-k)$ . Из этого соотношения следует, что ФМАП может надежно работать даже при  $d_{\text{min}} = 2$ , если  $s+r = k$ .

Значения  $\rho_{\text{Ф}}$  и  $E_{\text{Ф}}$  при различных методах кодирования в МАОК приведены в таблице. Из таблицы видно, что надежная работа коррелятора достигается лишь при дополнительном кодировании, используемом в коде 3 или 4. При этом кодирование 3 имеет следующие преимущества: во-первых, не требует специальных устройств кодирования-декодирования признаков и, во-вторых, легко осуществляет сложный поиск, требующий маскирования разрядов.

Однако при кодировании 3 для надежной фиксации на ФМ несовпадения признаков в одном разряде необходимо иметь в корреляторе разницу между мощностями световых сигналов основного разряда и опорной единицы больше порога срабатывания ФМАП. Это требует либо увеличения чувствительности ФМАП или мощности МИЭ, либо уменьшения быстродействия МАОК.

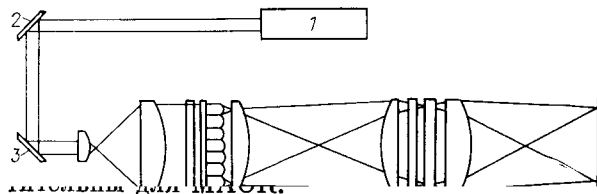


Рис. 4. Схема оптико-механической системы лабораторного макета коррелятора:

1 — лазер ЛГ-38; 2, 3 — зеркала; 4 — телескоп; 5, 9 — фототранспаранты; 6 — цилиндрический линзовый растр; 7, 8 — цилиндрические линзы; 10 — клиновый растр;

**3. Экспериментальные исследования.** В экспериментах ставилась цель проверки функционального взаимодействия друг с другом оптических компонентов оптико-механической системы МАОК.

Экспериментальные исследования оптико-механической системы коррелятора проводились на макете МАОК, схема которого показана на рис. 4.

Страницы признаков опроса и ассоциативных признаков, содержащие по 24 16-разрядных слова, отображались соответственно на фототрафаретах (ФТ) 5 и 9 в парафазном коде в виде прямоугольных матриц, состоящих из  $16 \times 24$  парафазных ячеек. Каждая парафазная ячейка представляет собой две позиции, расстояние между которыми 0,7 мм, при этом в одной из позиций находится прозрачное круглое пятно диаметром 0,4 мм на непрозрачном фоне. В зависимости от положения этой позиции в парафазной ячейке отображается «1» или «0». Шаг между парафазными ячейками в ФТ 9 по обеим координатам 0,7 мм, а в ФТ 5 0,7 и 0,95 мм соответственно по горизонтали и вертикали.

Цилиндрический линзовый растр 6 состоял из 24 склеенных между собой и наклеенных на стеклянную пластину с размерами  $35 \times 35 \times 2$  мм цилиндрических линз, каждая длиной 24 мм, толщиной 3 мм, высотой 0,95 мм, со световой щелью 0,7 мм, фокусным расстоянием 5,1 мм. Цилиндрические линзы 7, 8 имели прямоугольную форму  $30 \times 56$  мм толщиной 8 мм и фокусным расстоянием  $F_{7,8} = 80$  мм. Фокусное расстояние сферического объектива 11  $F_{11} = 120$  мм при диаметре 42 мм.

Клиновый растр 10 состоял из 16 склеенных между собой клиньев длиной 30 мм и толщиной 0,65 мм, наклеенных на стеклянную пластинку с размерами  $31 \times 31 \times 1$  мм. Наименьший преломляющий угол клина в клиновом растре  $\sim 44$  угл. мин, а дискретный шаг изменения преломляющего угла  $\sim 88$  угл. мин.

В экспериментах определялись точность и качество проецирования геометрических размеров ФТ 5 цилиндрической оптикой в плоскость ФТ 9. Линейный растр световых полос в плоскости ФТ 9 показан на рис. 5, а. Параметры растра: ширина световой полосы 0,42 мм, шаг расположения полос 1,4 мм, длина световой полосы 5,6 мм, ширина растра, измеренная по верхнему, среднему и нижнему уровням, соответственно 16,90; 16,90; 16,88 мм. Измерения производились на микроскопе ИМЦ-100-50А. Отношение сигнал/помеха в изображении 12 : 1. Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что изображение ФТ 5 достаточно точно отображается цилиндрической оптикой на ФТ 9, а невысокое отношение сигнал/помеха подтверждает необходимость использования для признаков дополнительного избыточного кодирования.

На рис. 5, б показано световое распределение в плоскости 12 в случае полного несовпадения всех признаков во всех разрядах, т. е. когда страница признаков опроса представлена на ФТ 5 одними парафазными «1», а страница ассоциативных признаков на ФТ 9 — одними «0». Измеренные параметры растра точек в плоскости 12 (в ФТ 5 диафрагмой

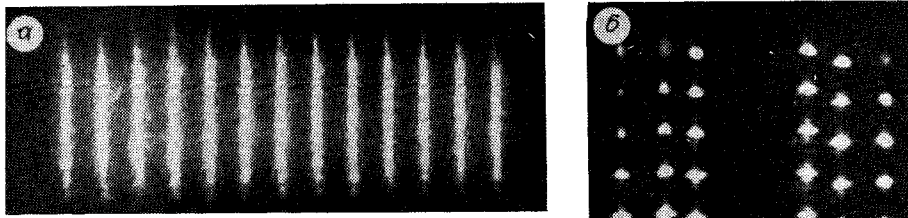


Рис. 5. Световые распределения:  
 а — во входной плоскости ФТ 9; б — в выходной плоскости 12 (цифровые обозначения взяты из рис. 4)

открыто 12 строк): диаметр точек 0,55 мм, шаг расположения по горизонтали (слева направо) 1,74; 1,15; 4,43; 1,35; 1,71 мм, по вертикали 1,55 мм. Разброс величин шага по горизонтали связан с разбросом преломляющих углов клиньев в клиновом растре 10. В силу того что в макете коррелятора использовалась не матрица клиньев (см. рис. 2), а клиновый растр, в котором каждому слову ассоциативного признака, отображенному на ФТ 9 одной строкой, соответствовал один клин, в плоскости 12 растр точек воспроизводился не полностью (см. п. 1).

В целом исследования макета подтвердили работоспособность оптико-механической системы данного МАОК.

**Заключение.** В работе рассматривались некоторые вопросы создания ассоциативных оптических корреляторов. Наличие у таких МАОК важной и интересной особенности — возможности осуществлять быстрый ассоциативный поиск одновременно и независимо по большому количеству признаков опроса, недоступный в настоящее время ни одной из известных или разрабатываемых систем памяти, на иных, не оптических, физических принципах, делает создание МАОК весьма перспективным для повышения производительности и расширения функциональных возможностей вычислительных комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вербовецкий А. А., Федоров В. Б. Оптические системы памяти с ассоциативно-адресной выборкой информации // Квантовая электроника.— 1980.— 7, № 8.
2. Вербовецкий А. А. К вопросу построения оптических систем и организации ассоциативной выборки информации в голографических запоминающих устройствах большой емкости // АИТ.— 1984.— № 10.
3. Гибин И. С., Кибирев С. Ф., Наймарк С. И. и др. Голограммные ЗУ с ассоциативной обработкой страниц информации // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по голографии.— Л.: ЛИЯФ, 1978.
4. Твердохлеб П. Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки массивов данных // Автометрия.— 1981.— № 1.
5. Вербовецкий А. А., Зимоглядова Е. А., Федоров В. Б. Ассоциативные оптические корреляторы для вычислительных систем // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по вычислительной оптикоэлектронике «Проблемы оптической памяти».— Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1987.— Ч. I.
6. Твердохлеб П. Е. Логическая обработка данных в матричном оптико-электронном процессоре // Оптико-электронные методы обработки изображений/Под ред. С. Б. Гуревича.— Л.: Наука, 1982.
7. А. с. 915097 СССР. Блок оптической ассоциативной выборки информации для оптического запоминающего устройства/А. А. Вербовецкий.— Оpubл. в БИ, 1982, № 11.

Поступила в редакцию 9 февраля 1988 г.