

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ АССОЦИАТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
КОРРЕЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**Введение.** Одним из перспективных направлений создания ассоциативных оптических ЗУ (АОЗУ) для вычислительных систем является создание АОЗУ с двухуровневой организацией [1]. В таких ЗУ первый уровень состоит из адресного ЗУ, а второй уровень — это устройство, осуществляющее ассоциативный поиск в запоминающем устройстве первого уровня.

Предложенные и рассмотренные в [2] способы построения двухуровневых устройств, когда в качестве первого уровня могут быть использованы различные типы оперативных адресных ЗУ (например, электронные), т. е. уже хорошо освоенные промышленностью, а в качестве второго уровня — многоканальные ассоциативные оптические корреляторы (МАОК), показывают перспективность их использования в вычислительных системах.

В данной работе предложены и проанализированы оригинальные схемотехнические решения построения МАОК (характерной особенностью которых является способность вести ассоциативный поиск оптическими методами одновременно и независимо по разным каналам по нескольким признакам опроса) для осуществления одновременно простого и сложного поиска информации и МАОК со спектрально-селективным способом обработки информации, а также рассмотрена специфика организации сопряжения МАОК с голографическим ЗУ.

**Оптическая схема многоканального ассоциативного оптического коррелятора для простого и сложного поиска.** Оптическая схема такого коррелятора изображена на рис. 1. В отличие от корреляторов, рассмотренных в [2], данный коррелятор может проводить одновременно простой и сложный поиск информации. При простом поиске данный коррелятор осуществляет поиск информации по полному совпадению (т. е. по совпадению значений всех разрядов) признака опроса с ассоциативным признаком, а при сложном поиске — поиск информации по совпадению только некоторых определенных разрядов признаков.

Определение номеров разрядов происходит в два этапа. На первом этапе определяются адреса всех признаков, по которым произошло совпадение не менее чем в заданном количестве разрядов. При этом устройство работает, как в простом поиске, но вводится определенный опорный сигнал для выделения указанных признаков. Затем устройство переводится на второй этап поиска, на котором информация о найденных признаках запоминается на оптически управляемом транспаранте. Теперь устройство может одновременно работать в двух режимах: производить ассоциативный поиск, руководствуясь новой информацией, и одновременно определять номера совпавших разрядов для информации, хранящейся на оптически управляемом транспаранте.

В связи с тем, что схема коррелятора, представленная на рис. 1, существенно отличается от схем, описанных в [2], ее работа будет рассмотрена подробно в режиме как простого, так и сложного поиска.

1. В режиме простой ассоциативной выборки информации данный коррелятор работает следующим образом:

Матрица лазерных диодов МЛД-1 преобразует электрические сигналы в оптические таким образом, чтобы каждому  $n$ -му (где  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ , а  $N$  — число строк лазерных диодов в МЛД-1) ассоциативному

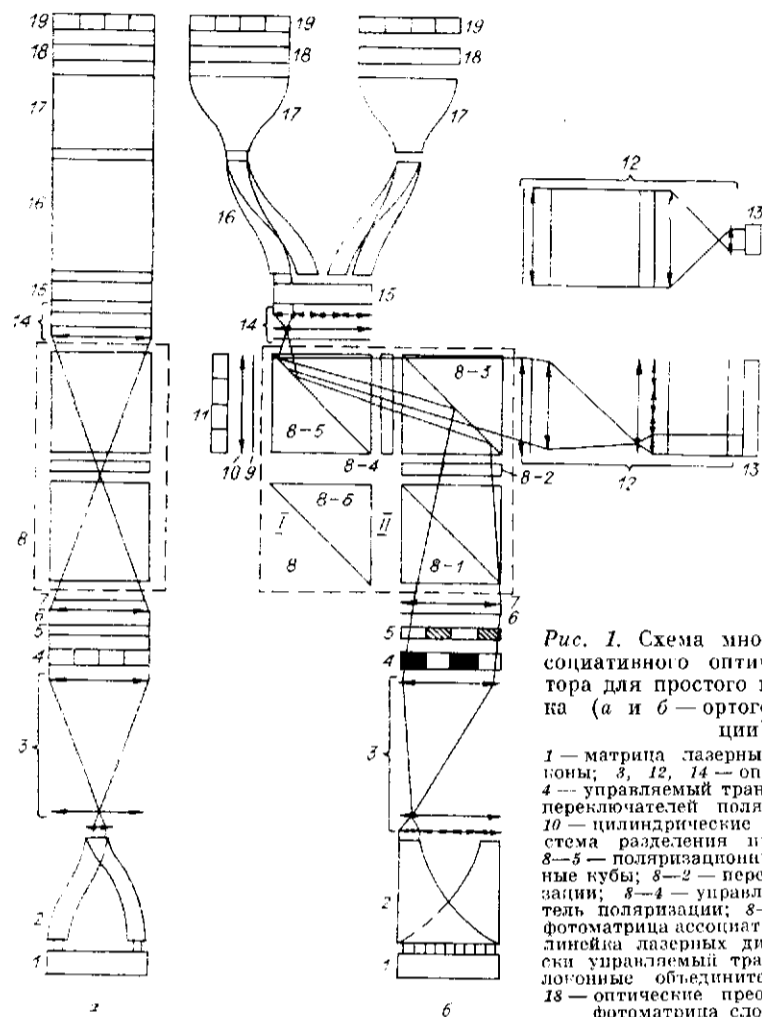


Рис. 1. Схема многоканального ассоциативного оптического коррелятора для простого и сложного поиска (а и б — ортогональные проекции):

1 — матрица лазерных диодов; 2 — фокусы; 3, 12, 14 — оптические системы; 4 — управляемый транспарант; 5 — растр переключателей поляризации; 6, 7, 9, 10 — цилиндрические объективы; 8 — система разделения пучков; 8-1, 8-3, 8-5 — поляризационные светоделительные кубы; 8-2 — переключатель поляризации; 8-4 — управляемый переключатель поляризации; 8-6 — призма; 11 — фотоматрица ассоциативного поиска; 13 — линза лазерных диодов; 15 — оптически управляемый транспарант; 16 — волоконные объединители; 17 — фокусы; 18 — оптическая преобразователи; 19 — фотоматрица сложного поиска

признаку соответствовала  $n$ -я строка оптических сигналов на ее выходе. Эти оптические сигналы отображают ассоциативные признаки в прямом парафазном коде, при этом для обеспечения надежной работы коррелятора между двоичными знаками признаков располагаются опорные разряды в простом коде [2]. Фокусы 2 разводят, фокусируют и компонуют оптические сигналы отдельных  $n$ -х строк так, чтобы они располагались по порядку в одной средней строке.

На управляемом транспаранте УТ-4 отображаются  $K$  признаков опроса в обратном парафазном коде, между двоичными знаками которого располагаются опорные разряды в простом коде. При этом каждый  $k$ -й (где  $k = 1, 2, 3, \dots, K$ , а  $K$  — число строк светоклапанных ячеек в УТ-4) признак опроса занимает соответствующую  $k$ -ю строку УТ.

Световые пучки, отображающие  $n$ -й ассоциативный признак, с помощью оптической системы 3 освещают под соответствующим определенным углом все  $k$ -е признаки опроса, отображенные на транспаранте 4. Таким образом осуществляется оптическое умножение всех  $n$ -х ассоциативных признаков на все  $k$ -е признаки опроса, и при этом оптические сигналы произведений разделены в пространстве. При этом, например, световые опорные пучки проходят через растр 5 переключателей поляризации, и их плоскость поляризации поворачивается на  $90^\circ$  относительно признаков пучков. Поляризационный светоделительный куб 8-1 системы 8 разделяет опорные и признаки пучки, направляя их соответственно по каналам I и II.

Цилиндрические объективы 7 и 10 (рис. 1, б) суммируют оптические сигналы, прошедшие УТ-4, на элементах фотоприемной матрицы ассоциативного поиска ФМАП-11, а в ортогональной плоскости объективы 6, 9 проецируют изображение УТ-4 на ФМАП-11, имеющую  $N \times K$  парафазных элементов. При этом фотоприемный элемент ФМАП-11 с координатами  $n$  и  $k$  регистрирует оптический сигнал, соответствующий  $n$ -му ассоциативному признаку и  $k$ -му признаку опроса. Координаты  $n$  и  $k$  парафазных фотоприемных элементов, на которых оптические сигналы опорных разрядов превышают оптические сигналы основных разрядов, определяют соответственно  $n$ -е ассоциативные признаки и  $k$ -е признаки опроса, по которым произошло полное совпадение.

2. В режиме сложной ассоциативной выборки информации коррелятор работает следующим образом.

Предположим, что нам необходимо найти все слова исходной информации, у которых ассоциативные признаки совпадают с признаками опроса не менее чем в  $l$  (где  $l = 1, 2, 3, \dots, s$ , а  $s$  — максимальное число разрядов в признаке) разрядах, и определить номера этих разрядов в признаках. В этом случае количество единичных опорных сигналов ( $\rho$ ) в МЛД-1 и УТ-4 равно  $\rho = 1 + (s - l)$ .

Определение номеров разрядов, по которым произошло совпадение признаков, производится в два этапа.

На первом этапе находится адреса всех признаков, по которым произошло совпадение не менее чем в  $l$  разрядах. При этом коррелятор работает так же, как описано в п. 1, с той лишь разницей, что теперь в МЛД-1 включено  $\rho$  единичных опорных сигналов. Поэтому координаты  $n$  и  $k$  парафазных фотоприемных элементов ФМАП-11, на которых оптические сигналы опорных разрядов превышают оптические сигналы основных разрядов, определяют соответственно  $n$ -е ассоциативные признаки и  $k$ -е признаки опроса, в которых произошло совпадение не менее чем в  $l$  разрядах.

После этого на управляемый переключатель 8-4 и оптически управляемый транспарант ОУТ-15 подаются напряжения, и световое распределение, существующее за УТ-4, переносится через оптическую систему 14 на ОУТ-15 и запоминается на нем в виде микрокадров.

После этого напряжение с переключателя 8-4 снимается, и коррелятор может одновременно работать в двух режимах: производить ассоциативный поиск новой информации (см. п. 1) и одновременно находить номера совпавших разрядов признаков для информации, хранищейся на ОУТ-15.

Определение номеров разрядов, по которым произошло совпадение признаков, осуществляется следующим образом.

Микрокадры на транспаранте 15 разбиты, например, на  $p$  (где  $p = 1, 2, 3, \dots, N$ ) групп по  $\mu$  (где  $\mu = 1, 2, 3, \dots, N$ ) столбцов в группе ( $\mu = N/p$ ).

Световые пучки от линейки лазерных диодов (ЛЛД) 13 через системы 12, 8, 14 высвечивают с ОУТ-15 по одному столбцу микрокадров из каждой  $p$ -й группы. При этом ЛЛД-13 высвечивает только столбцы, которые содержат  $nk$ -е признаки с не менее чем  $l$  совпавшими разрядами. Отметим, что в совпавших разрядах световые пучки отсутствуют.

Оптические сигналы с любого  $\mu$ -го столбца каждой  $p$ -й группы через волоконный объединитель 16 и фокус 17 поступают на оптический преобразователь 18. Выход каждого волоконного объединителя матрицы 1 преобразователя (рис. 2) расположен так, что его выходной световой пучок всегда отображает парафазную «1» независимо от того, поступает на вход объединителя световой пучок, отображающий парафазную «1» или парафазный «0». В канале 11 преобразователя световые пучки поступают на транспарант 3, который расположен так, чтобы они отображали на нем парафазные «0». Те ячейки транспаранта, в которых не

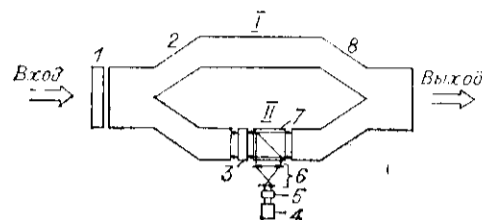


Рис. 2. Схема оптического преобразователя:

1, 8 — матрицы волноводных объединителей; 2 — матрица волноводных разветвителей; 3 — поляризационный оптически управляемый транспарант; 4 — лазер; 5 — маска парафазных нулей; 6 — телескоп; 7 — поляризационный светоделительный куб

отображена информация, поворачивают плоскость поляризации световых пучков, поступивших от лазера 4, на  $90^\circ$ , и эти пучки проходят через поляризационный светоделительный куб 7 на матрицу волноводных объединителей 8, отображая парафазные «0». Матрица волноводных объединителей 8 объединяет оптические сигналы, идущие по каналам I и II преобразователя таким образом, что во всех местах расположения двоич-

**Основные параметры коррелятора.** 1. В режиме простого ассоциативного поиска:

*Число признаков*, одновременно обрабатываемых МАОК в режиме простого ассоциативного поиска, определяется из выражения

$$C = nK. \quad (1)$$

Например, при  $N = K = 100$  получим  $C = 10^4$  слов.

*Быстродействие МАОК* оценим, как и в [2], из энергетических соотношений временем  $\tau_n$  срабатывания фотоприемной матрицы II:

$$\tau_n = E/P_\phi, \quad (2)$$

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:  $P_{л1}$  — световая мощность лазерного диода ЛЛД-1,  $K_{ут}$  — оптическое пропускание УТ-4,  $K_{о1}$  — пропускание оптических элементов схемы.

Тогда формула (2) для расчета быстродействия МАОК в простом режиме примет вид

$$\tau_n = EK/P_{л1}K_{ут}K_{о1}. \quad (3)$$

Полагая  $E = 10^{-14}$  Дж,  $P_{л1} = 1$  мВт,  $K_{ут} = 0,25$ ,  $K_{о1} = 0,5$ , получим

$$\tau_n \approx 10^{-10} \text{ К}. \quad (4)$$

Например, при  $K = 50$  слов (как в [2]) из (4) получим  $\tau_n \approx 5$  нс.

Таким образом, по сравнению с коррелятором, рассмотренным в [2], данный МАОК в режиме простого ассоциативного поиска при том же числе одновременно обрабатываемых признаков может иметь на порядок большее быстродействие.

2. В режиме сложного поиска:

*Число разрядов*, обрабатываемых МАОК, определится из выражения

$$Q = nKs. \quad (5)$$

Например, при  $N = K = s = 100$  получим  $Q = 10^6$  разрядов.

*Быстродействие МАОК* в этом режиме также оценим из выражения (2), обозначив:  $P_{л2}$  — световая мощность лазерного диода ЛЛД-13,  $K_{оут}$  — пропускание ОУТ-15,  $K_{оп}$  — пропускание оптического преобразователя,  $K_{о2}$  — пропускание оптических элементов схемы.

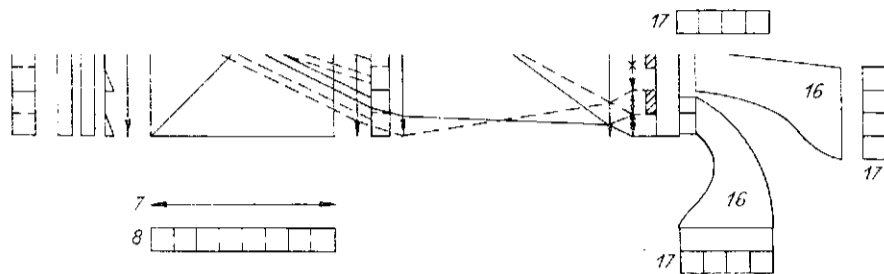


Рис. 3. Схема МАОК со спектрально-селективным способом обработки информации: 1 — матрица перестраиваемых лазерных диодов; 2 — дифракционная решетка; 3 — матрица голографических расщепителей; 4 — линзовый растр; 5, 7, 9, 11, 12 — объективы; 6 — поляризационный светоделительный куб; 8 — МЛД; 10 — многоцветный оптически управляемый транспарант; 13 — линзовый растр; 14 — растр переключателей поляризации; 15 — пластина двулучепреломляющего кристалла; 16 — фоконы; 17 — ФМАП

Тогда формула (2) для расчета быстродействия МАОК в режиме сложного поиска примет вид

$$\tau_c = EK/P_{л2}K_{ОУТ}K_{ОП}K_{\sigma 2}. \quad (6)$$

Полагая  $E = 10^{-14}$  Дж,  $P_{л2} = 10$  мВт,  $K_{ОУТ} = 0,25$ ,  $K_{ОП} = 1$ ,  $K_{\sigma 2} = 0,5$ , получим  $\tau_c \approx 10^{-11}$  К. Например, при  $K = 50$  слов из (6) найдем  $\tau_c \approx 0,5$  нс.

Учитывая, что в данной схеме в режиме сложного поиска последовательно могут опрашиваться  $\mu$  столбцов в ОУТ-15, получим, что полное время поиска составит

$$\tau_{сп} \approx \mu \tau_c. \quad (7)$$

Например, если  $\mu = 10$ , то  $\tau_{сп} \approx 5$  нс.

Таким образом, в режиме сложного поиска время поиска номеров совпавших разрядов в признаках примерно такое же, как и время определения ассоциативного совпадения признаков при простом поиске, поэтому оба режима хорошо согласуются друг с другом в одном МАОК.

Следует отметить, что если в данной схеме коррелятора так же, как и в [2], применить методы мультиплицирования световых лучков, то число одновременно обрабатываемых признаков может составить порядка  $10^7$  слов при быстродействии порядка 10 мкс.

**Многоканальный ассоциативный оптический коррелятор со спектрально-селективным способом обработки информации.** Схема такого МАОК изображена на рис. 3.

В отличие от корреляторов, представленных в [2], рассматриваемый коррелятор (см. рис. 3) работает в некотором определенном спектральном диапазоне, за счет чего число одновременно обрабатываемых признаков может быть увеличено примерно на 2—4 порядка. Признаки опроса в данном корреляторе отображаются на матрице перестраиваемых лазерных диодов (МЛД), а ассоциативные признаки — на многоцветном оптически управляемом транспаранте (МЦОУТ) 10. При этом каждое слово представляется дискретным набором длин волн таким образом, что разряды одного слова отображаются на разных длинах волн, а одноименные разряды разных слов представлены световыми пучками с одной длиной волны.

Коррелятор работает следующим образом.

Из внешнего устройства  $n$  (где  $n = 1, 2, 3, \dots, r$ , а  $r$  — число излучательных элементов в МЛД-8) ассоциативных признаков поступают на

МЛД-8 так, что разряды каждого признака попадают последовательно на одну и ту же пару излучателей МЛД-8, соответствующую этому признаку. МЛД-8 преобразует электрические сигналы в парафазные оптические сигналы таким образом, чтобы каждому  $i$ -му (где  $i = 1, 2, 3, \dots, s$ , а  $s$  — максимальная разрядность признака) парафазному разряду признака соответствовала своя длина волны света  $\lambda_i$ . При этом каждому  $n$ -му ассоциативному признаку соответствует на выходе МЛД-8 два многоцветных пучка. Эти оптические сигналы отображают ассоциативные признаки в коде Рида — Маллера, каждый двоичный разряд которого представлен в прямом парафазном коде. Кроме того, каждый  $n$ -й источник излучения посылает опорный сигнал парафазного нуля на длине волны  $\lambda_0$ , отличной от длин волн  $\lambda_i$  основных признаковых сигналов.

С МЛД-8 оптические сигналы поступают на МЦОУТ-10 и отображаются в каждой его  $n$ -й парафазной ячейке целый ассоциативный признак (целое число) в виде наложенных друг на друга цветных точек. При этом если МЛД-8 выполнена из одноволновых излучателей, то на МЦОУТ-10 подается напряжение и за счет эффекта Штарка осуществляется сдвиг спектра поглощения транспаранта и производится выжигание провалов в различных областях его спектра поглощения одноволновыми излучателями.

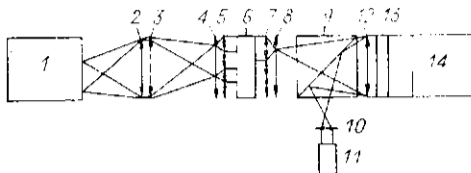
От внешнего устройства  $K$  (где  $K = 1, 2, 3, \dots, \gamma$ , а  $\gamma$  — число излучательных элементов в МПЛД-1) признаков опроса поступают на МПЛД-1 так, что разряды каждого признака попадают последовательно на одну и ту же ее пару излучательных элементов, соответствующую этому признаку. МПЛД-1 преобразует электрические сигналы в парафазные оптические сигналы таким образом, чтобы каждому  $i$ -му парафазному разряду признака опроса соответствовала своя длина волны света  $\lambda_i$ . При этом каждому  $K$ -му признаку опроса соответствуют на выходе МПЛД-1 два многоцветных пучка. Эти оптические сигналы отображают признаки опроса в коде Рида — Маллера, каждый двоичный разряд которого представлен в обратном парафазном коде. Кроме того, каждый  $K$ -й источник излучения посылает опорный сигнал парафазного нуля на длине волны  $\lambda_0$ , отличной от длин волн  $\lambda_i$  основных признаковых сигналов.

Каждый многоцветный световой пучок, отображающий единичные парафазные разряды каждого  $K$ -го признака опроса (см. рис. 3, сплошные линии), проходит через дифракционную решетку, голографическим расщепителем размножается на  $n$  многоцветных световых пучков так, чтобы через коллективный 5 и коллимирующий 9 объективы осветить все  $n$ -е части парафазных ячеек МЦОУТ-10, отображающие парафазные единицы. Аналогично каждый многоцветный световой пучок, отображающий нулевые парафазные разряды каждого  $K$ -го признака опроса (штриховые линии), проходит дополнительно через оптический клин клинового раstra 4, направляющий его на все  $n$ -е части парафазных ячеек МЦОУТ-10, отображающие парафазные нули ассоциативных признаков. При этом дифракционная решетка 2, обеспечивая направление световых пучков с МПЛД 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 одинаковое расстояние между элементами.

Таким образом осуществляется оптическое умножение всех  $K$ -х признаков опроса на все  $n$ -е ассоциативные признаки, и при этом оптические сигналы произведений разделены в пространстве.

Объектив 11 фокусирует и направляет оптические сигналы произведений единичных разрядов каждого  $K$ -го признака опроса и единичных разрядов всех  $n$ -х ассоциативных признаков на соответствующую  $K$ -ю линзу линзового раstra 13. На выходе этой линзы появляется микронизображение единичного разряда  $K$ -го признака опроса, промодулированного всеми  $n$ -ми единичными разрядами ассоциативных признаков,

Рис. 4. Оптическая схема сопряжения  
 МАОК с голографическим ЗУ:  
 1 — ГЗУ; 2—4, 8, 10, 12 — объективы; 5,  
 7 — линзовые растры; 6 — жгут волоконных  
 световодов; 9 — поляризационный свето-  
 объединительный куб; 11 — лазер; 13 —  
 ОУТ; 14 — МАОК



отображенных на МЦОУТ-10; это микроизображение проходит пластину двулучепреломляющего кристалла 15. Аналогично на выходе  $K_0$ -й линзы линзового растра появляется микроизображение нулевого разряда  $K$ -го признака опроса, промодулированного всеми нулевыми разрядами ассоциативных признаков, отображенных на МЦОУТ-10. Это изображение проходит растр переключателей поляризации 14 и смещается (за исключением опорных разрядов) пластиной 15 так, чтобы на ее выходе световые пучки, отображающие единичные и нулевые двоичные знаки одного слова, суммировались.

Эти световые пучки фокусом 16 направляются на  $K$ -й ФМАП-17. Координаты  $n$ -го фотоприемного элемента  $K$ -го ФМАП-17, на котором оптический сигнал опорного разряда превышает оптический сигнал основных разрядов, определяют соответственно  $n$ -й ассоциативный признак, а номер этого ФМАП-17 —  $K$ -й признак опроса, по которому произошло совпадение. Таким образом производится отыскание адреса ассоциативного признака в странице ассоциативных признаков и адреса признака опроса в странице признаков опроса, по которым произошло совпадение.

Учитывая, что МПЛД-1 и МЦОУТ-10 могут содержать соответственно порядка  $10^4$  —  $10^6$  излучателей и порядка  $10^4$  —  $10^6$  светоклапанных ячеек, общее число одновременно обрабатываемых признаков может достигать  $10^{12}$  слов. При этом время определения совпадения  $\tau$  в данной схеме можно оценить временем формирования слов признаков опроса на МПЛД-1. Например, если  $s = 100$ , то при времени срабатывания лазерного диода порядка 1 нс получим  $\tau \approx 100$  нс.

**Способ организации сопряжения МАОК с голографическим ЗУ.** На рис. 4 показана оптическая схема сопряжения МАОК с голографическим ЗУ. МАОК работает совместно с голографическим ЗУ (ГЗУ) 1, в котором реализуется режим многоэтапной ассоциативной выборки информации [3], на каждом  $i$ -м (где  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , а  $m$  — число микроголограмм на носителе) этапе опрашивается группа, состоящая из  $p_i$  (где  $p = 1, 2, 3, \dots, m$ ) микроголограмм.

С выхода ГЗУ оптические сигналы, соответствующие  $p_i$ -м микроголограммам, проходят через объективы 2—4 и за каждой  $r_i$ -й линзой растра 5 появляется изображение ассоциативного признака соответствующей микроголограммы. Волоконные световоды 6 объединяют изображения отдельных ассоциативных признаков, восстановленных с  $p_i$ -х микроголограмм, которые присутствуют на  $r_i$ -х входах жгута 6, в единую картину на соответствующем  $s$ -м выходе. При этом каждый ассоциативный признак занимает в этой картине соответствующую  $n$ -ю (где  $n = 1, 2, 3, \dots, p_i$ ) строку. Оптической системой, состоящей из линзового растра 7 и объективов 8, 12, картина ассоциативных признаков отображается на ОУТ-13.

Световой пучок от лазера 11 освещает ОУТ-13 и модулируется им в соответствии с отображенной на транспаранте картиной. Промодулированный световой пучок параллелен оптической оси системы и играет роль МЛД в МАОК, который работает так же, как и корреляторы, описанные в данной работе или в [2].

**Заключение.** В данной работе рассмотрены некоторые схемотехнические вопросы построения многоканальных ассоциативных оптических корреляторов для организации одновременно простого и сложного поиска и МАОК со спектрально-селективным способом обработки информа-

ции, характерной особенностью которых является способность вести ассоциативный поиск оптическими методами одновременно и независимо (по разным каналам) по многим признакам опроса. Проанализированы основные параметры МАОК, в частности, показано, что корреляторы со спектрально-селективным способом обработки могут одновременно обрабатывать до  $10^{12}$  признаков при времени определения совпадения порядка 100 нс. Предложен также способ организации сопряжения МАОК с голографическими ЗУ. Проведенный анализ предложенных способов и схем показывает перспективность создания МАОК для повышения производительности и расширения функциональных возможностей вычислительных комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердохлеб П. Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки массивов данных // Автометрия.— 1981.— № 1.
2. Вербовецкий А. А., Зимоглядова Е. А. Принципы построения многоканальных ассоциативных оптических корреляторов для вычислительных систем // Автометрия.— 1989.— № 5.
3. Вербовецкий А. А. К вопросу построения оптических систем и организации ассоциативной обработки информации в голографических запоминающих устройствах большой емкости // АИТ.— 1984.— № 10.

*Поступила в редакцию 3 апреля 1989 г.*

УДК 621.3.049.771.12 : 621.396.96(088.8)

**И. Э. ВОРНОВИЦКИЙ, А. И. КОЗЛОВ, Х. И. КЛЯУС, Е. И. ЧЕРЕПОВ**  
(Москва — Новосибирск)

#### **ТРИДЦАТИДУХТОЧЕЧНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ СВЕРТЫВАТЕЛЬ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ**

Для радиолокационных, радионавигационных систем и систем связи характерно применение корреляционной обработки, ортогональных преобразований, фильтрации сигналов и изображений в режиме реального времени. Ядром вышеуказанных алгоритмов является свертка сигналов. Для проведения свертки, особенно в случае двумерных сигналов (изображений), требуется выполнить большой объем вычислений, но эти вычисления являются регулярными. Универсальные ЭВМ в настоящее время недостаточно обеспечены вычислительными средствами для обработки в реальном масштабе времени больших массивов данных [1]. При построении бортовых вычислительных систем в условиях жесткого ограничения стоимости, габаритов, массы и потребляемой мощности наиболее предпочтительно применение дискретно-аналоговых устройств [1—3]. Для быстрой реализации двумерной свертки предложен матричный бинарно-аналоговый модуль, выполненный на приборах с зарядовой связью (ПЗС) [4]. Однако физическая реализация этого ПЗС-модуля наталкивается на технологические затруднения, связанные с его матричной структурой. Кроме того, часто количество шин (и их разрядность) между оперативным запоминающим устройством (ОЗУ) и процессором является ограничивающим фактором. Такие ситуации возникают, когда процессор реализован на дискретно-аналоговых схемах и велики затраты на организацию большого числа цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) на одном кристалле. Организация аналогового «скользящего окна» на дискретных элементах осложняется аппаратными затратами, резко возрастающими при увеличении формата двумерной свертки [5]. Одномерный систолический массив выполняет свертку второго порядка

© 1990 Ворновицкий И. Э., Козлов А. И., Кляус Х. И., Черепов Е. И.