

ВЫВОДЫ

Представлен новый класс вычислительных алгоритмов для псевдоинверсного восстановления изображений. Эти алгоритмы позволяют избежать неустойчивости численных решений. С их помощью восстановление размытых и зашумленных изображений возможно даже при очень плохой обусловленности матрицы размытия. Вычислительные алгоритмы требуют выполнения над размытым изображением двумерного преобразования Фурье с последующим скалярным взвешиванием коэффициентов преобразования, после чего выполняется обратное двумерное преобразование Фурье для того, чтобы воспроизвести восстановленное изображение. При использовании этих алгоритмов возможна экономия в вычислениях в несколько тысяч раз по сравнению с обычными алгоритмами, использующими псевдоинверсию матриц. При использовании в электронных или электрооптических приборах параллельного преобразования Фурье возможен еще больший выигрыш.

Выражаю признательность господину Икраму Абду из Института обработки изображений Южной Калифорнии за помощь, оказанную в подготовке экспериментальной части этого доклада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sondhi M. M. Image restoration: the removal of spatially invariant degradations.— "Proc. of the IEEE", 1972, vol. 60, N 7, p. 842—853.
2. Pratt W. K., Davarian F. Fast computational techniques for pseudoinverse and wiener image restoration.— "IEEE Trans. on Computers (to be published).
3. Andrews H. C., Patterson C. L. Outer product expansions and their uses in digital image processing.— "American Mathematical Monthly", 1975, vol. 1, N 82, p. 1—13.
4. Andrews H. C., Patterson C. L. Outer product expansions and their uses in digital image processing.— "IEEE Trans. on Computers" 1976, vol. C-25, N 2, p. 140—148.
5. Andrews H. C., Patterson C. L. Singular value decompositions and digital image processing.— "IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Proc.", 1976, vol. ASSP-24, N 1, p. 26—53.
6. Pratt W. K. Digital image processing. Wiley. N. Y., 1977.

Поступила в редакцию 26 июля 1976 г.

УДК 621.373.826 : 722.99

**И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, С. Ф. КИБИРЕВ,
Е. Ф. ПЕН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ**

(Новосибирск)

ГОЛОГРАММНЫЕ ЗУ С ФУНКЦИЯМИ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ

Введение. В работе [1] описана функциональная модель ассоциативного оптического ЗУ с двухуровневой организацией памяти. Первый, основной уровень предназначен для хранения и адресной выдачи массивов данных, второй, признаковый уровень — для хранения описаний (признаков, ключевых слов) этих массивов и оперативного поиска их адресов по запросам пользователей. Поиск производится путем сравнения слова запроса с содержимым ячеек признаковой памяти, что связано с необходимостью вычисления многомерного (по числу ячеек) функционала «близости» и последующего принятия решения. Были определены основные виды функционалов, используемых

при поиске, однако вопросы их аппаратной реализации не затрагивались.

Настоящая работа частично восполняет этот пробел. В ней изложены методы организации признаковой памяти на основе голограммных ЗУ (ГЗУ), у которых система адресации позволяет выбирать из модуля памяти не только одну произвольную страницу информации, но и любую комбинацию из 10^3 — 10^4 и более страниц с наложением и суммированием их в плоскости фотоматрицы, а система фотоэлектронного считывания обеспечивает одновременное восприятие всех элементов результирующего оптического изображения, их параллельную логическую обработку и хранение промежуточных результатов при многошаговых алгоритмах поиска.

Для определенности будем полагать, что запрос на входе признаковой памяти задается в виде совокупности числовых признаков, имеющих двоичную форму представления, а подлежащие вычислению функционалы «близости» выражаются системой однородных логических функций.

Известен ряд работ [2—7], в которых исследованы возможности выполнения в ГЗУ операций простого поиска, основанных на вычислении системы простейших логических функций — функций неравнозначности (равнозначности). В отличие от этого предлагаемые ниже аппаратные средства позволяют вычислять однородную систему произвольных логических функций и тем самым оказываются пригодными для реализации сложных видов поиска. Один из вариантов признаковой памяти с такими возможностями описан нами в [8].

Работа состоит из двух частей. В первой части систематизированы типовые задачи поиска по совокупности числовых (в том числе логических) признаков и указаны алгоритмы их решения с учетом специфики их реализации в ГЗУ. Во второй части предложены структуры признаковых ГЗУ, ориентированных на решение сложных перестраиваемых видов поиска по совокупности признаков. Рассмотрены оптические и электронные системы таких устройств, реализующих основные виды поиска.

Эффективность признаковых ГЗУ по быстродействию на 2—3 порядка превышает возможности современных ЭВМ [8]. Малое время поиска обеспечивается за счет хранения, восстановления и обработки информации страницами.

I. Задачи и методы поиска. Объектами поиска в ассоциативном ГЗУ являются массивы цифровых, буквенно-цифровых, графических и т. п. данных $D_1, \dots, D_h, \dots, D_H$. Массивы хранятся в ячейках основной памяти, адреса которых однозначно связаны с их номерами $1, \dots, h, \dots, H$. Каждому из массивов D_h в признаковой памяти соответствует описание, представляющее собой набор из R ключевых слов $K_h = \{k_{h1}, \dots, k_{hr}, \dots, k_{hR}\}$, где $k_{hr} = (k_{hr1} \dots k_{hrn} \dots k_{hrN_r})$ — двоичные N_r -разрядные числа. Аналогичным образом представим запрос: $Z = \{z_1, \dots, z_r, \dots, z_R\}$, где $z_r = (z_{r1} \dots z_{rn} \dots z_{rN_r})$ — двоичное число, содержащее N_r разрядов. Ниже будем предполагать, что ключевые слова для разных признаков имеют одинаковую разрядность — $N_r = N$.

Выборку информации из памяти будем производить в два этапа. На первом из них в признаковой памяти для каждого из R признаков запроса вычислим значение однородной системы из H логических функций:

$$Y_r = \begin{bmatrix} y_{1r} \\ \vdots \\ y_{hr} \\ \vdots \\ y_{Hr} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Аргументами функций y_{hr} являются двоичные разряды r -го ключевого слова запроса и одноименного ему слова в описании массива данных с номером h . Вид функций определяется задачей поиска по r -му признаку. Если оказалось, что $y_{hr}=1$, то индекс h указывает на номер массива данных, удовлетворяющего этому признаку.

Адреса массивов данных, соответствующих результату поиска по совокупности признаков, вычисляются в признаковой памяти путем формирования массива $A=(a_1, \dots, a_h, \dots, a_H)$, где

$$a_h = \prod_{r=1}^R y_{hr}, \quad (2)$$

\prod — знак логического умножения.

По найденным адресам на втором этапе поиска из основной памяти извлекается искомая информация.

Функции признаковой и основной памяти в принятых обозначениях указаны в табл. 1.

Системы логических функций $Y_1, \dots, Y_r, \dots, Y_R$ можно вычислять в признаковой памяти параллельно, последовательно-параллельно и последовательно по признакам, общее число которых равно R . Аналогичным образом можно вести поиск по двоичным разрядам одноименных признаков массивов данных и запроса. С этой целью выразим функции y_{hr} через более простые функции неравнозначности, которые, как показано в [7, 8], еще сравнительно просто вычисляются в оптических системах ГЗУ и тем самым позволяют установить границу использования таких систем при логической обработке информации. Тогда остальные операции, необходимые для вычисления компонентов (1) и (2), должны быть возложены на фотоэлектронную систему ГЗУ.

Задачу поиска информации по виду систем функций Y_r можно разделить на две группы.

1.1. Первая группа. Эта группа включает задачи поиска массивов, ключевые слова которых равны (неравны), больше (меньше), больше равны (меньше равны), а также логически связаны с соответствующими ключевыми словами в запросе или лежат в заданных пределах. Для указанной группы задач поиска необходимо вычислять систему логических функций вида

$$y_{hr} = f(z_r; k_{hr}), \quad h=1, 2, \dots, H. \quad (3)$$

Это означает, что для каждого h -го адреса памяти реализуется заданное логическое соотношение между разрядами одноименных ключевых слов описания h -го массива и запроса.

Т а б л и ц а 1

Признаковая память		Основная память
Хранение описаний массивов данных	Вычисление адресов массивов	Хранение массивов данных, адресная выборка
$k_{11}, \dots, k_{1r}, \dots, k_{1R}$	$y_{11} \dots y_{1r} \dots y_{1R} \quad a_1$	D_1
.....
$k_{h1}, \dots, k_{hr}, \dots, k_{hR}$	$y_{h1} \dots y_{hr} \dots y_{hR} \quad a_h$	D_h
.....
$k_{H1}, \dots, k_{Hr}, \dots, k_{HR}$	$y_{H1} \dots y_{Hr} \dots y_{HR} \quad a_H$	D_H

Система функций (3), как следует из [9], может быть представлена в дизъюнктивном виде

$$y_{hr} = \bigcup_{q=1}^Q \bar{p}_{hrq}, \quad (4)$$

где

$$p_{hrq} = \bigcup_{n=1}^N (z_{rnq} \bar{k}_{hrn} + \bar{z}_{rnq} k_{hrn}) \quad (5)$$

— функция неравнозначности между ключевым словом k_{hr} и словом опроса z_{rq} , а \bigcup — символ логической суммы. Если считать, что Q определяет количество шагов (итераций), необходимых для вычисления функции y_{hr} , то слово опроса z_{rq} в отличие от слова запроса z_r зависит от номера шага. При этом способ формирования слов опроса $z_{r1}, \dots, z_{rq}, \dots, z_{rQ}$ из слова запроса z_r зависит от решаемой задачи поиска. Количество разрядов в слове опроса также равно N с той лишь разницей, что эти разряды, кроме значений 1 и 0, могут принимать нейтральное состояние, обозначаемое символом M (маска), и не участвовать при вычислении функций неравнозначности p_{hrq} .

Учет характера задачи поиска при формировании слов опроса производится следующим образом. Если необходимо найти адреса массивов, ключевые слова которых равны одноименным ключевым словам запроса, то в этом случае $Q=1$, $z_{r1}=z_r$, а функции \bar{p}_{hrq} в выражении (4) соответствует функция равнозначности слов z_r и k_{hr} . При решении более сложных задач количество составляющих в выражении (4) отлично от единицы. Действительно, при поиске массивов с признаками, удовлетворяющими условию $k_{hr} > z_r$, серия слов опроса формируется путем анализа двоичного слова, соответствующего признаку z_r . В этом слове, рассматриваемом слева направо, на первом шаге находится первый из старших разрядов, имеющий значение 0. Этот разряд переводится в состояние 1, а все остальные разряды слова, находящиеся справа, маскируются. Полученное слово опроса z_{r1} используется для поиска адресов массивов, ключевые слова которых имеют единицы в старших незамаскированных разрядах. Это осуществляется путем решения задачи простого поиска. Результат поиска запоминается. На втором шаге восстанавливается исходное состояние изменяемого разряда слова z_r и производится поиск следующего по весу разряда, имеющего значение 0. Как и ранее, этот разряд переводится в состояние 1, а разряды справа маскируются. Полученное слово z_{r2} используется далее для поиска очередной группы адресов массивов, имеющих единицы во всех незамаскированных разрядах одноименных ключевых слов. В соответствии с (4) результат поиска на очередном шаге объединяется с результатом поиска на предыдущем шаге. Процесс поиска на последующих шагах подобен описанному. Очевидно, что в этом случае число шагов Q не превышает числа разрядов в двоичном представлении признака z_r .

Аналогичным образом, но с последовательной заменой 1 на 0 производится поиск адресов массивов, ключевые слова которых меньше заданного ($k_{hr} < z_r$).

Нетрудно также проследить способы решения остальных задач рассматриваемой группы. Так, задача поиска массивов с ключевыми словами, находящимися в заданных пределах, т. е. удовлетворяющих условию $z_r'' < k_{hr} < z_r'$, решается путем использования системы функций вида

$$y_{hr} = y_{hr}^{\bar{0}} \cap y_{hr}^M, \quad h = 1, 2, \dots, H, \quad (6)$$

где

$$y_{hr}^{\bar{0}} = \bigcup_{q=1}^Q \bar{p}_{hrq}, \quad y_{hr}^{\bar{1}} = \bigcup_{q=1}^Q p_{hrq}$$

— функции типа (4), позволяющие отдельно вычислить адреса массивов, для которых выполняются условия $k_{hr} > z_r''$ и $k_{hr} < z_r'$.

Функции, используемые при поиске адресов массивов, удовлетворяющих условиям $k_{hr} \geq z_r''$ или $k_{hr} < z_r'$ имеют вид логической суммы:

$$\begin{aligned} y_{hr}^{\text{BP}} &= y_{hr}^{\bar{0}} \cup y_{hr}^{\bar{1}}; \\ y_{hr}^{\text{MP}} &= y_{hr}^{\bar{0}} \cup y_{hr}^{\bar{1}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $y_{hr}^{\bar{0}} = \bar{p}_{hr}$ — функция равнозначности слов $z_r'(z_r'')$ и k_{hr} .

Таким образом, решение задач поиска первой группы по одному заранее определенному признаку сводится к формированию по запросу z_r серии слов опроса, вычислению по этим словам функций неравнозначности p_{hrq} и их последующему суммированию с инверсией в соответствии с выражениями (4) и (7). В отдельных случаях (задача поиска по неравенству), кроме указанных операций, выполняется операция логического умножения (6).

Важным свойством задач этой группы является то, что слова опроса, формируемые на последующих шагах, не зависят от результатов поиска на предыдущих шагах и могут быть получены все сразу при одном полном анализе слова запроса. Тем самым при наличии соответствующих аппаратных средств поиск может производиться одновременно по всем словам опроса.

1.2. Вторая группа. Эта группа включает задачи поиска массивов данных, ключевые слова которых являются экстремальными (среди заданного множества описаний), ближайшими большими (меньшими) к слову запроса и упорядоченными по величине. При решении таких задач вычисляют систему логических функций вида

$$y_{hr} = f(z_r; k_{hr}; k_{sr}), \quad h=1, 2, \dots, H. \quad (8)$$

В отличие от выражения (3) указанные логические функции зависят не только от разрядов ключевых слов запроса z_r и соответствующего этому адресу описания k_{hr} , но и от разрядов ключевых слов описаний других массивов — k_{sr} , $s=1, 2, \dots, H$, $s \neq h$.

Специфичной операцией при решении задач поиска указанной группы является операция поиска ключевых слов с экстремальным значением. Остановимся на алгоритмах выполнения этой операции, предполагая, что среди заданного множества ключевых слов $Y_r(0)$ имеются такие, которые удовлетворяют условию экстремума.

Поиск экстремума, обычно рассматриваемый как часть упорядоченной выборки, осуществляется путем реализации многошаговой процедуры:

$$Y_r(1), \dots, Y_r(q), \dots, Y_r(Q),$$

где

$$Y_r(q) = [y_{1r}(q), \dots, y_{hr}(q), \dots, y_{nr}(q)]$$

— система функций, определяемая на q -м шаге. Указанная последовательность систем функций вычисляется по серии слов опроса z_{rq} , $q=1, 2, \dots, Q$, так же как и в случае задач первой группы. Отличие состоит лишь в том, что слово опроса, формируемое на q -м шаге зависит от результата поиска на $(q-1)$ -м шаге. Методы решения задач поиска экстремума отличаются правилами анализа результатов поиска и составления последовательности слов опроса.

При параллельном поиске по двоичным разрядам признака z_r на q -м шаге среди заданного множества ключевых слов находятся такие, которые совпадают со словом опроса z_{rq} . С этой целью реализуется вычисление системы функций

$$y_{hr}(q) = \bigcup_{n=1}^N [z_{rnq} \bar{k}_{hrn} + \bar{z}_{rnq} k_{hrn}] y_{hr}(0), \quad (9)$$

где $y_{hr}(0)$ — элементы исходного множества $Y_r(0)$.

Функция анализа

$$s(q-1) = y_{1r}(q-1) + \dots + y_{hr}(q-1) + \dots + y_{Nr}(q-1), \quad (10)$$

определяемая по методу Фрея и Гольдберга [10], равна 1 или 0 в зависимости от наличия или отсутствия хотя бы одного адреса, удовлетворяющего слову опроса на $(q-1)$ -м шаге.

Если начальное слово опроса имеет значение $\underbrace{MM \dots M}_N$, то разряды последующих слов опроса при поиске ключевых слов, например с максимальным значением, формируются по правилу

$$z_{rnq} = \begin{cases} M, & \text{если } n > q; \\ 1, & \text{если } n = q; \\ s(q-1), & \text{если } n = q-1; \\ z_{rn(q-1)}, & \text{если } n < q-1. \end{cases} \quad (11)$$

Практически это означает, что q -й разряд в слове опроса z_{rq} равен 1, разряды справа маскированы, $(q-1)$ -й разряд равен значению функции анализа результата поиска на предыдущем шаге, а остальные разряды остаются без изменения.

Процесс поиска ключевых слов с минимальным значением аналогичен описанному. Изменяются лишь частично условия формирования разрядов слов опроса:

$$z_{rnq} = \begin{cases} M, & \text{если } n > q; \\ 0, & \text{если } n = q; \\ \bar{s}(q-1), & \text{если } n = q-1; \\ z_{rn(q-1)}, & \text{если } n < q-1. \end{cases} \quad (12)$$

Число слов опроса Q по методу Фрея и Гольдберга совпадает с числом разрядов N в их двоичном представлении. Последовательность значений функций анализа (или ее инверсии), полученных в процессе поиска, соответствует разрядам искомым экстремальных ключевых слов.

При последовательном поиске по разрядам признаков серия из N слов опроса формируется путем сдвига единицы слева направо в исходном слове $1 \dots M \dots M$. На q -м шаге в этом случае система логических функций $Y_r(q)$ вычисляется следующим образом:

$$y_{hr}(q) = y_{hr}(q-1) k_{hrq} s(q-1) + y_{hr}(q-1) \bar{s}(q-1), \quad (13)$$

$$h=1, 2, \dots, H$$

при поиске максимального ключевого слова;

$$y_{hr}(q) = y_{hr}(q-1) k_{hrq} s(q-1) + y_{hr}(q-1) \bar{s}(q-1), \quad (14)$$

$$h=1, 2, \dots, H$$

при поиске минимального ключевого слова.

Функция анализа $s(q-1)$ так же, как и ранее, вычисляется в виде логических сумм:

$$s(q-1) = k_{1rq}y_{1r}(q-1) + \dots + k_{hrq}y_{hr}(q-1) + \dots + k_{Nrq}y_{Nr}(q-1) \quad (15)$$

при поиске максимального ключевого слова;

$$s(q-1) = \bar{k}_{1rq}y_{1r}(q-1) + \dots + \bar{k}_{hrq}y_{hr}(q-1) + \dots + \bar{k}_{Nrq}y_{Nr}(q-1) \quad (16)$$

при поиске минимального ключевого слова.

Смысл операций, выполняемых при поиске максимальных (минимальных) ключевых слов, заключается в следующем. Из массива адресов, полученного на $q-1$ -м шаге и заданного системой логических функций $Y_r(q-1)$, на q -м шаге с помощью операции $y_{hr}(q-1)k_{hrq}$ («вычеркиваются») те адреса, ключевые слова которых не имеют единичного (нулевого) q -го разряда. Текущий массив адресов, заданный системой логических функций $Y_r(q)$, совпадает с вычисленным, если в нем есть хотя бы один адрес, в противном случае он совпадает с массивом адресов, полученным на предыдущем шаге. Таким образом, за N шагов найдутся адреса ключевых слов, имеющих единицы (нули) в более старших разрядах.

Сокращение числа опросов при поиске ключевых слов, имеющих экстремальное значение, можно получить путем применения более сложных процедур анализа. Так, например, согласно алгоритму Сибе-ра и Линдквиста [10], функция анализа, кроме 0 и 1, принимает третье значение, когда в результате поиска получился один адрес. В этом случае поиск прекращается на промежуточном шаге, а найденный адрес соответствует экстремальному слову.

Остальные задачи второй группы сводятся к задачам поиска первой группы и поиска экстремума. Поэтому поиск ближайшего меньшего (большого) может быть реализован путем применения операций поиска по неравенству и поиска максимума (минимума). В свою очередь, упорядоченная выборка в порядке возрастания (или убывания) ключевых слов осуществляется путем многократного применения процедуры поиска ближайшего большего (или меньшего) к последовательности выбранных ключевых слов, начиная с минимального $\underbrace{00 \dots 0}_N$ (или максимального $\underbrace{11 \dots 1}_N$).

II. Методы построения признаков ГЗУ. Обычно задача поиска адресов массивов данных решается системами типа «ЭВМ — внешнее ЗУ» (рис. 1, а). На внешние ЗУ (магнитные ленты, диски, барабаны) возложены функции хранения и выдачи информации, а на ЭВМ — функции ее обработки. Время поиска определяется временем передачи данных по каналу связи ЗУ — ЭВМ и временем обработки запроса программными средствами. Ситуация не меняется, если в качестве

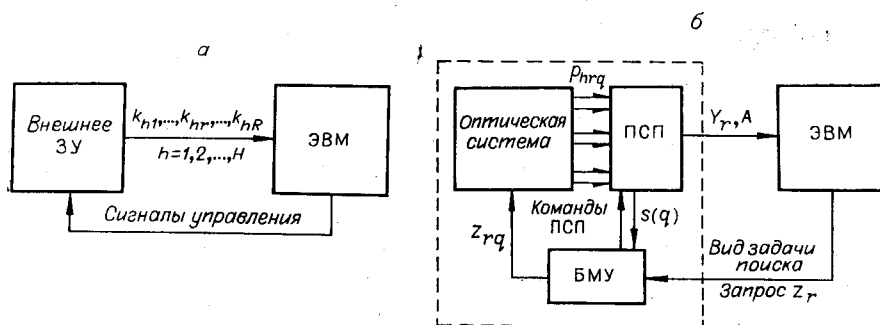


Рис. 1.

внешнего ЗУ использовать обычное ГЗУ. Ограниченная пропускная способность канала связи (1—2 Мбайт/с) не позволяет реализовать возможности быстрой выборки данных из таких устройств (10—100 Мбайт/с).

Производительность системы поиска «ЭВМ—внешнее ЗУ» можно существенно увеличить, если адреса массивов данных вычислять непосредственно в ЗУ аппаратными средствами.

Согласно [7, 8], в оптических системах ГЗУ можно вычислять лишь функции неравнозначности ключевых слов запроса и описаний массивов данных, что достигается путем параллельной адресации к голограммам памяти, восстановления комбинации страниц информации и сложения их в плоскости фотоматрицы. Этого, однако, недостаточно для реализации сложных видов поиска. Действительно, из выражений (4), (6) и (7) следует, что при решении задач первой группы, помимо вычисления функций неравнозначности p_{hrq} , необходимо выполнять логические операции инверсии, умножения и суммирования. В свою очередь, при решении задач второй группы, помимо указанных операций, на каждом из шагов необходимо вычислять значение функций анализа $s(q)$ вида (10), (15) и (16).

Выполнение операций, не свойственных оптическим системам, целесообразно возложить на фотоэлектронную систему ГЗУ, которая в отличие от фотоматрицы обычного ГЗУ должна быть более функционально развитой. При поступлении на ее вход изображений, соответствующих результатам предварительной обработки страниц информации или самим страницам, в такой системе, помимо фотоэлектрического преобразования и ввода-вывода данных, должна происходить логическая обработка, анализ и хранение промежуточных результатов, причем указанные операции должны выполняться по всем каналам одновременно. Фотоэлектронная система в этом случае попадает в разряд многоканальных специализированных вычислительных устройств, которые будем называть параллельными страничными процессорами (ПСП). Конструктивно ПСП может быть выполнен, например, в виде гибридной БИС с оптическим входом.

В системе поиска, указанной на рис. 1, б, используется признаковое ГЗУ, включающее оптическую систему, параллельный страничный процессор и блок микропрограммного управления (БМУ). Вид задачи поиска и слово запроса z , задаются ЭВМ. БМУ формирует серию слов опроса оптической системы и управляет работой ПСП в соответствии с решаемой задачей поиска. Для задач второй группы БМУ формирует серию слов опроса с учетом значений функции анализа $s(q)$ на каждом шаге. По каналу связи ГЗУ—ЭВМ в этом случае передается в ЭВМ лишь искомый массив адресов A .

Далее остановимся на вариантах оптических систем и ПСП, позволяющих реализовать следующие основные виды поиска:

- а) параллельный по признакам и разрядам признаков;
- б) последовательный по признакам и параллельный по разрядам признаков;
- в) последовательный по признакам и разрядам признаков.

При этом будем считать, что оптические системы памяти могут быть построены по принципу «голограмма—адрес» ($G—A$) или по принципу «голограмма—признак» ($G—P$). В первом случае в отдельной голограмме регистрируются разряды всех ключевых слов, составляющих описание одного массива данных. Емкость голограммы— $R \times N$ бит. Количество голограмм равно количеству адресов H . Во втором случае регистрируются одноименные разряды фиксированного ключевого слова, содержащегося в описаниях всех массивов. Емкость голограммы— H бит. Количество голограмм равно общему количеству двоичных разрядов, т. е. $R \times N$. Достоинством ГЗУ, организованного

по принципу Г—А и обозначаемого далее ГЗУ Г—А, является простота дозаписи ключевых слов новых массивов данных. В этом случае достаточно записать в матрице еще одну голограмму, содержащую ключевые слова нового массива, и присвоить этой странице адрес, соответствующий координате записанной голограммы. Подобная операция в ГЗУ, организованном по принципу Г—П и обозначаемом далее ГЗУ Г—П, связана с необходимостью перезаписи всей матрицы голограмм, так как появление нового массива приводит к частичному изменению содержания всех ранее записанных голограмм. Несмотря на это, принцип записи «голограмма — признак» представляет интерес для приложений с редко обновляемыми, но нарастающими массивами данных.

II.1. Оптические системы. II.1.1. Параллельный поиск по признакам и разрядам признаков. На рис. 2 представлены соответствующие этому случаю оптические системы признаков ГЗУ Г—А (а) и Г—П (б), где 1 — матрица голограмм, 2 — пространственный модулятор света, 3 — объектив, 4 — линзовый растр и 5 — ПСП.

В каждой из H голограмм матрицы 1 ГЗУ Г—А записаны в парафазном коде признаки

$$k_{hr} = (k_{hr1} \bar{k}_{hr1} \dots k_{hrn} \bar{k}_{hrn} \dots k_{hrN} \bar{k}_{hrN}), \quad r = 1, 2, \dots, R. \quad (17)$$

Эти признаки сравниваются одновременно со словами опроса

$$z_{rq} = (\bar{z}_{r1q} z_{r1q} \dots \bar{z}_{rnq} z_{rnq} \dots \bar{z}_{rNq} z_{rNq}), \quad (18)$$

которые вводятся в оптическую систему в обратном парафазном коде с помощью пространственного модулятора света 2. Сравнение происходит путем пропускания под разными углами изображений ключевых слов, восстановленных из разных голограмм, через пространственные модуляторы света со словами опроса. Изображения ключевых слов, полностью совпавших с изображениями слов опроса, через модулятор не проходят.

Входная плоскость ПСП с помощью объектива 3 и элементов линзового растра 4 по R каналам проективно связана с плоскостью матрицы голограмм. Результат обработки формируется в этой плоскости в виде светового распределения из k групп по H световых «точек». Нулевые элементы этих групп соответствуют единичным значениям функций неравнозначности p_{hrq} вида (5).

В оптической системе ГЗУ Г—П изображения слов опроса (18), формируемые в парафазном коде с помощью пространственного модулятора света 2, проектируются на матрицу голограмм 1. В паре голограмм, соответствующих n -му разряду r -го признака, записаны одно-

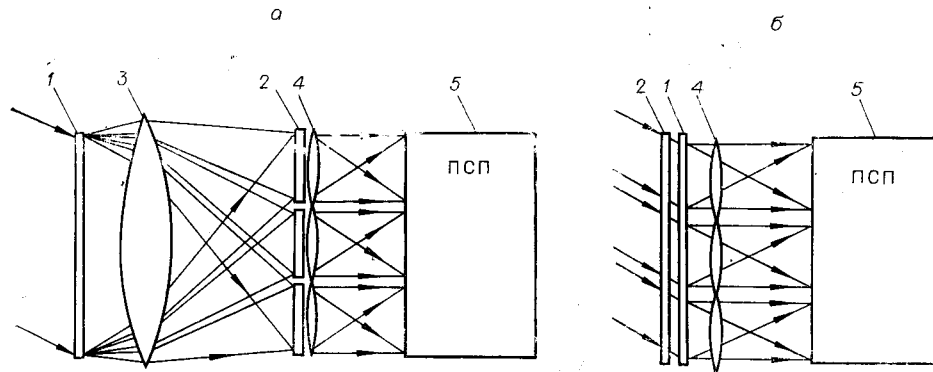


Рис. 2.

именные разряды всех ключевых слов в обратном ($\bar{k}_{1rn}, \dots, \bar{k}_{hrrn}, \dots, \bar{k}_{Hrrn}$) и прямом ($k_{1rn}, \dots, k_{hrrn}, \dots, k_{Hrrn}$) кодах. Восстановленные из голограмм двоичные массивы, соответствующие разрядам ключевых слов, формируются во входной плоскости ПСП элементами линзового растра 4 в R группе по H световых «точек». Номера групп результирующего светового распределения и координаты нулевых элементов внутри группы указывают соответственно на номера ключевых слов и адреса массивов данных, удовлетворяющих заданному слову опроса памяти.

Реализация признаков ГЗУ с параллельным поиском по признакам и разрядам признаков требует использования для ввода слов опроса двумерных пространственных модуляторов света. Поэтому интерес представляют более простые оптические системы ГЗУ с последовательным поиском по признакам. В таких системах размерность модулятора света не превышает разрядности ключевых слов признаков.

II.1.2. Последовательный поиск по признакам и параллельный по разрядам признаков. Соответствующие оптические системы приведены на рис. 3, где 1 — матрица голограмм; 2 — линейный (одномерный) пространственный модулятор света, 3 — дефлектор, 4 — линзовый растр, 5—7 — объективы и 8 — ПСП. В системе, приведенной на рис. 3, а, информация записана по принципу Г—А, а в системе на рис. 3, б — по принципу Г—П.

В оптической системе ГЗУ Г—А изображения страниц ключевых слов, заданных в прямом парафазном коде, восстанавливаются из матрицы голограмм 1 и совмещаются в плоскости линейного модулятора 2. Слова опроса памяти по отдельным признакам вводятся в обратном парафазном коде с помощью модулятора. Поиск осуществляется путем сдвига изображений страниц ключевых слов относительно одномерного модулятора, что требует изменения угла наклона восстанавливающего пучка к матрице голограмм. Для этого дефлектор 3 отклоняет пучок лазера на одну из линз растра 4, после чего коллективная линза 5 формирует наклонную световую волну. Расстояние между линзами растра должно быть выбрано таким, чтобы при переключении пучка лазера от линзы к линзе восстановленное изображение сдвигалось относительно модулятора на одну позицию.

В оптической системе ГЗУ Г—П проходящий световой поток модулируется в соответствии со словом опроса, заданным на линейном мо-

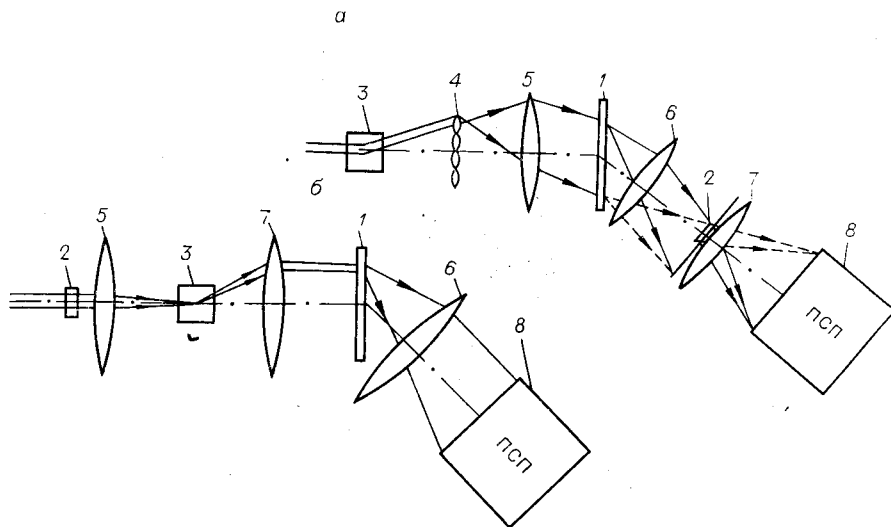


Рис. 3.

дуляторе 2. Матрица голограмм 1 в этом случае разбивается на R групп линейно расположенных голограмм, соответствующих отдельным признакам. Изображение слова опроса по r -му признаку с помощью дефлектора 3 отклоняется на r -ю группу голограмм.

На оптических входах ПСП обеих систем формируются изображения световых «точек», координаты нулевых элементов которых соответствуют адресам массивов данных, удовлетворяющих слову опроса.

II. 1.3. Последовательный поиск по признакам и разрядам признаков. Оптические системы признаковых ГЗУ, обеспечивающие рассматриваемый вид поиска, не требуют использования линейных и матричных модуляторов света и позволяют записывать ключевые слова в обычном двоичном (не парафазном) виде. Здесь оптическим способом решается лишь задача хранения информации, а операции ее обработки возложены на ПСП.

Схемы оптических систем, реализующих последовательный поиск по признакам и разрядам признаков, приведены на рис. 4, где 1 — дефлектор, 2 — линзовый растр, 3, 6, 7 — объективы, 4 — матрица голограмм, 5 — диафрагма и 8 — ПСП.

Память ГЗУ на рис. 4, а организована по принципу Г—А. Дефлектор 1 последовательно отклоняет световой пучок на линзы растра 2, после которого формируются световые точки, соответствующие разрядным ячейкам на информационном транспаранте при записи. Затем с помощью линзы 3 образуются наклонные световые волны, падающие на матрицу голограмм 4. Точечная диафрагма 5, установленная в задней фокальной плоскости объектива 6, пропускает световые пучки, восстановленные из голограмм матрицы 4 в направлении опорного пучка при записи. С помощью объектива 7 изображение плоскости матрицы голограмм проецируется на оптический вход ПСП 8. Так как через диафрагму проходят световые пучки только от тех голограмм, в которых присутствует опрашиваемый двоичный разряд, то на входе ПСП формируется матрица световых точек, характеризующая массив адресов, удовлетворяющих данному разряду признака.

Память ГЗУ на рис. 4, б организована по принципу Г—П. С помощью дефлектора 1 разряд за разрядом опрашивается матрица голограмм 2. При этом во входной плоскости ПСП последовательно восстанавливаются изображения матриц световых точек, соответствующих адресам массивов данных, удовлетворяющих отдельным разрядам признаков.

Таким образом, в процессе реализации основных видов поиска (II.1.1, II.1.2, II.1.3) оптические системы признаковых ГЗУ выполняют функции хранения признаков массивов данных и за исключением

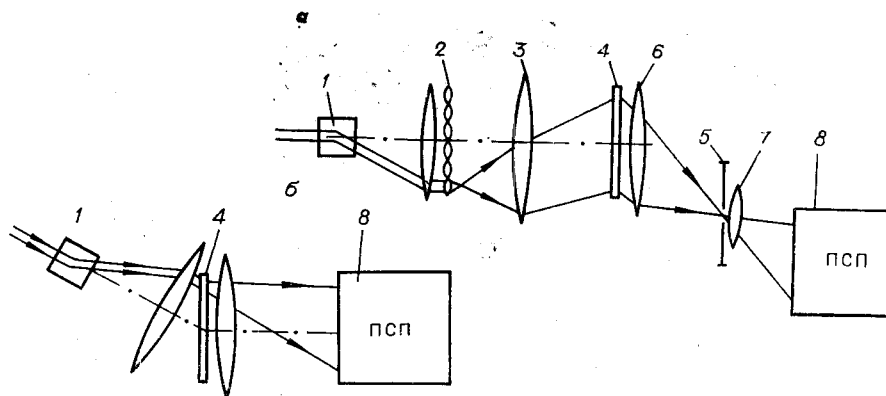


Рис. 4.

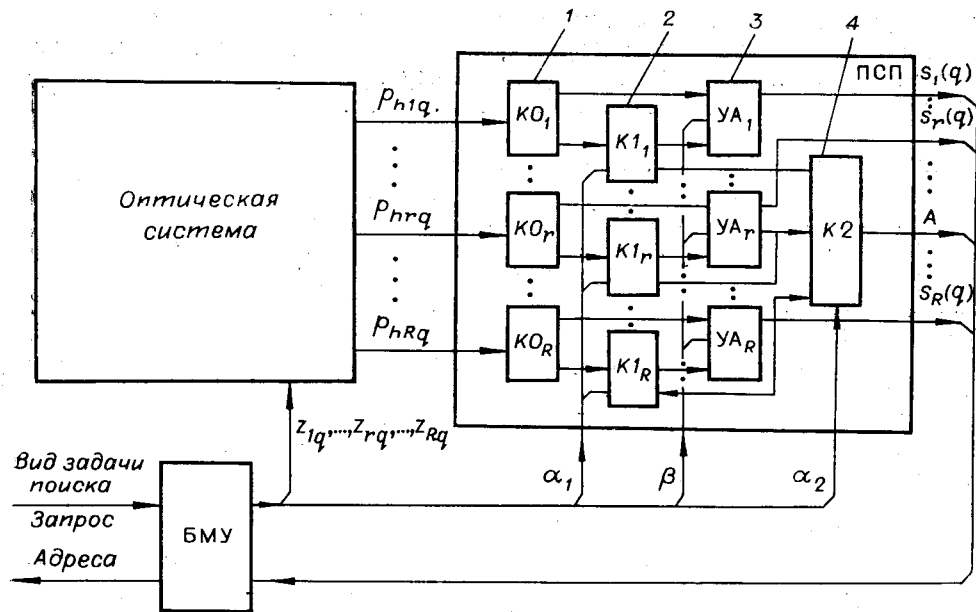


Рис. 5.

чисто последовательного вида поиска обеспечивают вычисление логических функций неравнозначности (равнозначности), соответствующих задачам простого поиска.

II.2. Процессоры. Остановимся теперь на структурах, функциях и командах ПСП, расширяющих возможности признаковых ГЗУ.

II.2.1. Параллельный поиск по признакам и разрядам признаков. Структурная схема ПСП для этого вида поиска приведена на рис. 5, где 1 — матрица фотоприемников, содержащая R подматриц из H элементов каждая; 2 — первый уровень памяти, содержащий R матриц триггеров по H элементов в каждой; 3 — устройства анализа данных $YA_r, r=1, 2, \dots, R$; 4 — второй уровень памяти, представляющий собой матрицу триггеров из H элементов. Перестройка входной логики триггеров первого и второго уровней памяти и управление схемой анализа данных осуществляются по командам от БМУ — $\alpha_1, \alpha_2, \beta$. Операции, выполняемые по этим командам, приведены в табл. 2, где подматрицам фотоприемников соответствуют двоичные страницы $KO_r, r=1, 2, \dots, R$, матрицам триггеров первого уровня памяти — страницы $K1_r, r=1, 2, \dots, R$, и матрице триггеров второго уровня памяти — страница $K2$.

Покажем, что указанный в табл. 2 набор операций является достаточным для решения задач поиска первой и второй групп. Будем полагать, что в оптических системах ГЗУ (см. рис. 2, а, б), соответствующих рассматриваемому варианту ПСП, параллельно по признакам вычисляются функции неравнозначности между одноименными словами опроса $z_{1q}, \dots, z_{rq}, \dots, z_{Rq}$ и ключевыми словами описаний массивов данных $k_{h1}, \dots, k_{hr}, \dots, k_{hR}$.

а) Задачи первой группы. Операции $\overline{KO_r} \rightarrow K1_r$ и $\overline{KO_r} + K1_r \rightarrow K1_r$ позволяют вычислить на первом уровне памяти систему логических функций вида (3). Это следует из выражения (4).

б) Задачи второй группы. Операции «В БМУ код $s(q)$ » и $\overline{KO_r} \cdot K1_r \rightarrow K1_r$ позволяют решать в ПСП задачу поиска экстремального ключевого слова в массиве, заданном единичными элементами страницы $K1_r$. На каждом шаге производится выполнение операции

Таблица 2

Вид поиска	Операции ПСП			
	Первый уровень памяти	Второй уровень памяти	Третий уровень памяти	Устройство анализа данных
Параллельный по признакам и разрядам	$\overline{K0}_r + K1_r \rightarrow K1_r$ $\overline{K0}_r \rightarrow K1_r$ $\overline{K0}_r \cdot K1_r \rightarrow K1_r$ $K2 \rightarrow K1_r$	$K1_1 \dots K1_r \dots K1_R \rightarrow$ $\rightarrow K2$	—	«В БМУ код $s_r(q)$ »
Последовательный по признакам и параллельный по разрядам признаков	$\overline{K0} + K1 \rightarrow K1$ $\overline{K0} \rightarrow K1$ $\overline{K0} \cdot K1 \rightarrow K1$ $K2 \rightarrow K1$	$K1 \cdot K2 \rightarrow K2$	—	«В БМУ код $s(q)$ »
Последовательный по признакам и разрядам признаков	$\overline{K0} \cdot K1 \rightarrow K1$ $\overline{K0} \cdot K1 \rightarrow K1$ Уст. «1» $K1$ $\overline{K0} \cdot K2 \rightarrow K2$ $\overline{K0} \cdot K2 \rightarrow K2$	$K1 + K2 \rightarrow K2$ $K1 \rightarrow K2$ $K3 \rightarrow K2$	$K2 \cdot K3 \rightarrow K3$ Уст «1» $K3$	«В БМУ код $s(q)$ »

Примечание. Знаки \cdot , $+$, $-$ соответствуют логическим операциям И, ИЛИ, НЕ; знак \rightarrow указывает уровень памяти, куда записывается результат операции.

$\overline{K0}_r \cdot K1_r$, что соответствует вычислению выражения (9), и оценивается результат поиска по функции анализа (10). На последнем шаге полученный результат записывается в r -ю матрицу первого уровня памяти с помощью операции $\overline{K0} \cdot K1_r \rightarrow K1_r$.

в) Поиск по системе признаков. На матрицах триггеров первого уровня памяти формируются системы логических функций $Y_1, \dots, Y_r, \dots, Y_R$. Массив A , указывающий адреса памяти, удовлетворяющие совокупности признаков, вычисляется в соответствии с выражением (2) на втором уровне памяти с помощью операции $K1_1 \dots K1_r \dots K1_R \rightarrow K2$. Операция $K2 \rightarrow K1_r$ позволяет решать задачи поиска по отдельным признакам среди заданного множества адресов.

II.2.2. Последовательный поиск по признакам и параллельный по разрядам признаков. Структура ПСП приведена на рис. 6. Здесь 1 — матрица из N фотоприемников; 2, 4 — первый и второй уровни памяти ПСП, представляющие собой матрицы триггеров из N элементов; 3 — устройство анализа данных. Перестройка входной логики матриц триггеров и управление схемой анализа данных осуществляются по командам от БМУ — $\alpha_1, \alpha_2, \beta$. Операции, выполняемые по этим командам, приведены в табл. 2, где матрице фотоприемников соответствует двоичная страница $K0$, а матрицам триггеров первого и второго уровня памяти ПСП — двоичные страницы $K1$ и $K2$. Система команд для рассматриваемой структуры ПСП такая же, как и в предыдущем ПСП, поскольку в обоих случаях поиск признаков осуществляется параллельно по разрядам признаков. Отличие заключается в том, что искомый массив A формируется здесь не параллельно, а последовательно по признакам с помощью операции $K1 \cdot K2 \rightarrow K2$.

ПСП предназначен для работы совместно с оптическими системами, изображенными на рис. 3.

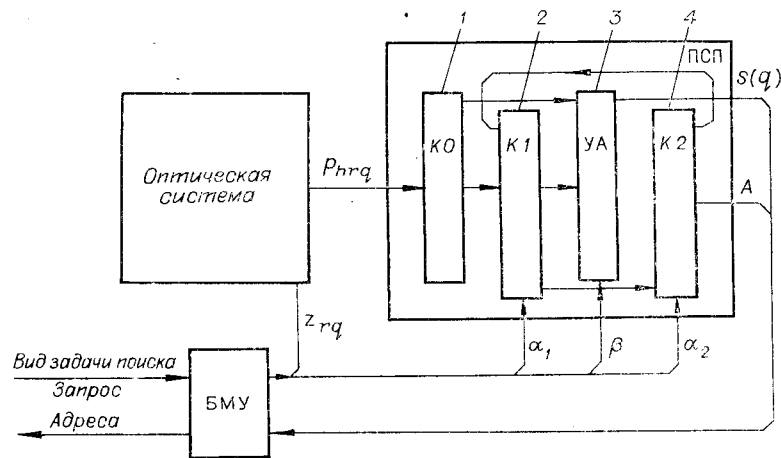


Рис. 6.

II.2.3. Последовательный поиск по признакам и разрядам признаков. Структура ПСП для этого случая приведена на рис. 7, где 1 — матрица фотоприемников из N элементов; 2, 4, 5 — первый, второй и третий уровни памяти, представляющие собой матрицы из триггеров с перестраиваемой входной логикой; 3 — устройство анализа данных УА. Перестройка входной логики матриц триггеров первого, второго и третьего уровней памяти и управление устройством анализа данных осуществляется от БМУ по командам α_1 , α_2 , α_3 и β . Операции, выполняемые в ПСП по этим командам, приведены в табл. 2. Фотоматрице соответствует двоичная страница K_0 , а первому, второму и третьему уровням памяти — страницы K_1 — K_3 .

а) Задачи первой группы. Логическому функционалу Y , в данном случае соответствует выражение (4), которое вычисляется с помощью операций: $K_0 \cdot K_1 \rightarrow K_1$, $\overline{K_0} \cdot K_1 \rightarrow K_1$, Уст. «1» K_1 , $K_1 + K_2 \rightarrow K_2$, $K_1 \rightarrow K_2$.

б) Задачи второй группы. Адреса экстремальных ключевых слов при последовательном поиске по разрядам признаков находятся в соответствии с выражениями (13) и (14). Они вычисляются с помощью операций: $K_0 \cdot K_2 \rightarrow K_1$, $\overline{K_0} \cdot K_2 \rightarrow K_1$. На каждом шаге результат поиска оценивается с помощью команды «В БМУ код $s(q)$ » путем вычисления

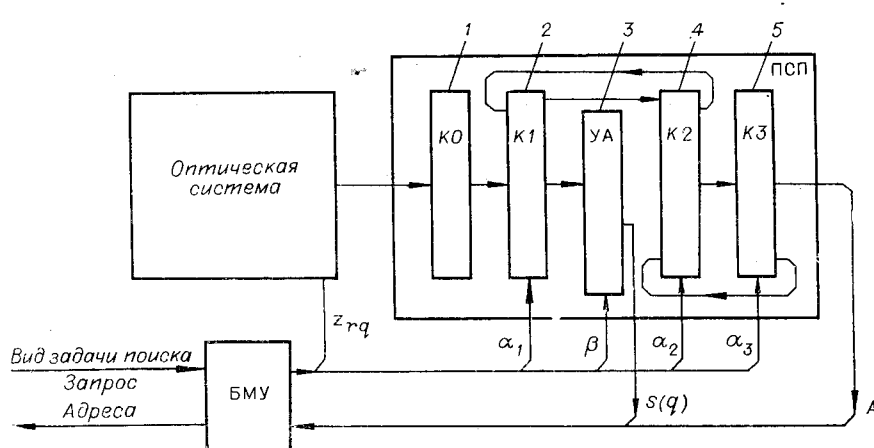


Рис. 7.

выражений (15) или (16). Область поиска по отдельным признакам задается командой $K3 \rightarrow K2$.

в) Поиск по системе признаков. Результат поиска по системе признаков формируется на третьем уровне памяти согласно выражению (2). Для этих целей предусмотрены операции $K2 \cdot K3 \rightarrow K3$ и Уст. «1» $K3$.

Данный ПСП предназначен для работы с оптическими системами, показанными на рис. 4.

Отметим, что приведенные на рис. 5—7 структуры ПСП иллюстрируют главным образом идеи преобразования двоичных страниц $K0$, $K1$ и $K2$ при сложных видах поиска. По этой причине в них не отражены способы выполнения стандартных процедур: ввода-вывода информации и формирования команд управления. Эти процедуры должны рассматриваться при проектировании ПСП, удовлетворяющих конкретным требованиям. Один из путей реализации ПСП — использование современной микроэлектронной технологии. В этом случае ПСП могут быть выполнены в виде однородной матрицы вычислительных элементов (одноразрядных специализированных микропроцессоров), совмещенных с матрицей фотодетекторов. Вычислительные элементы являются независимыми и связаны с БМУ общей магистралью управления и передачи данных. Конкретные виды поиска выполняются за счет микропрограммного управления вычислительными элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твердохлеб П. Е. Оптические системы памяти с выборкой по содержанию.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 3—14.
2. Sakaguchi M., Nichida N., Nemoto T. A new associative memory systems utilizing holography.— "IEEE Trans. on Computers", 1970, vol. C-19, N 2, p. 1174—1181.
3. Воскобойник Г. А., Гибин И. С., Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е. Применение когерентных оптических вычислительных устройств для решения задач информационного поиска.— «Автометрия», 1971, № 1, с. 77—82.
4. Гибин И. С., Гофман М. А., Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е. Ассоциативная выборка информации в голограммных запоминающих устройствах.— «Автометрия», 1973, № 5, с. 12—18.
5. Knight Gordon K. Page-oriented associative holographic memory.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 14, N 4, p. 904—912.
6. Gibin I. S., Tverdokhleb P. E. Information processing in optical systems of holographic memory devices.— "Proc. of the American-Soviet Seminar on Optical Information Processing". N. Y., Plenum Press, 1976.
7. Гибин И. С., Твердохлеб П. Е. Обработка информации в оптических системах голограммных ЗУ.— В кн.: Голография и обработка информации. Под ред. проф. С. Б. Гуревича. Л., «Наука», 1976, с. 5—23.
8. Гибин И. С., Гофман М. А., Кибирев С. Ф., Твердохлеб П. Е. Исследование одного варианта голограммной признаковой памяти.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 24—36.
9. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. М., «Энергия», 1968.
10. Крайзмер Л. П., Бородаев Д. А., Гутенмахер Л. И., Кузьмин Б. П., Смелянский И. Л. Ассоциативные запоминающие устройства. Л., «Энергия», 1967.

Поступила в редакцию 27 мая 1977 г.