

ОБРАБОТКА И ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

УДК 681.39 : 681.3.07 : 621.378.9

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ С ВЫБОРКОЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ

Введение. В течение последних десяти лет проводились исследования в области оптических (в том числе голограммных) ЗУ малого (до 10^8 — 10^9 бит) и большого (до 10^{12} — 10^{13} бит) объемов памяти, рассматриваемых главным образом в качестве внутренней и внешней памяти ЭВМ [1]. Подтверждена возможность создания таких ЗУ и ограничена сфера их применения преимущественно внешней архивной постоянной памятью ЭВМ. Уточнение оптимистических прогнозов конца 60-х годов (США: "Bell Laboratories" [2—4], IBM [5] и RCA [6, 7]; СССР [8—10]) произошло в связи с существенными достижениями в магнитной и полупроводниковой памяти и трудностями, встретившимися на пути разработки реверсивных фоточувствительных сред.

На наш взгляд, дальнейшее развитие оптических методов хранения информации и расширение области их применения тесно связано с созданием оптических (или, скорее всего, оптико-электронных) многоканальных систем памяти, выборка информации в которых производится не по адресу, как у большинства известных ЗУ, а по «смысловому» запросу. Содержимым такого запроса могут быть части массивов данных, находящихся в структурных единицах памяти, совокупность признаков, характеризующих эти массивы, и их функциональные отношения. Такие системы памяти получили название ЗУ с выборкой по содержанию или ассоциативных ЗУ [11—14].

Процесс выборки по содержанию, как известно, включает в себя этап поиска информации, удовлетворяющей входному запросу, и этап выдачи этой информации пользователю. Первый из них реализуется путем сравнения содержимого запроса с содержимым памяти; второй — путем адресного обращения к памяти. В результате ассоциативные оптические ЗУ (АОЗУ) оказываются адекватным инструментом для решения распространенных задач поиска, распознавания, диагностики, сортировки и т. п. Такие задачи наиболее часто возникают при обработке больших объемов научно-технической, экономической и других видов информации.

Большинство известных ассоциативных ЗУ [11, 12, 14] содержит два уровня памяти: признаковый и основной. На первом из них производится хранение признаков массивов данных и поиск адресов этих массивов по запросу; на втором — хранение и адресная выдача данных. Такое деление памяти разумно сохранить и в случае АОЗУ, поскольку к основному и признаковому уровню памяти предъявляются существенно разные требования по быстрдействию и емкости. Признаковое

ЗУ — оптическое ЗУ емкостью до 10^8 — 10^9 бит с быстродействующим доступом (1—10 мкс) и обработкой информации; основное ЗУ — оптический архив емкостью до 10^{12} — 10^{13} бит с временем доступа 10—100 с. Тем самым при создании АОЗУ может быть использован тот научно-технический опыт, который имеется в настоящее время в области оптической памяти, включая возможность многоканального поиска и доступа, обработки информации страницами, хранения и отображения смешанной (цифровой, буквенно-цифровой, графической и другой) информации.

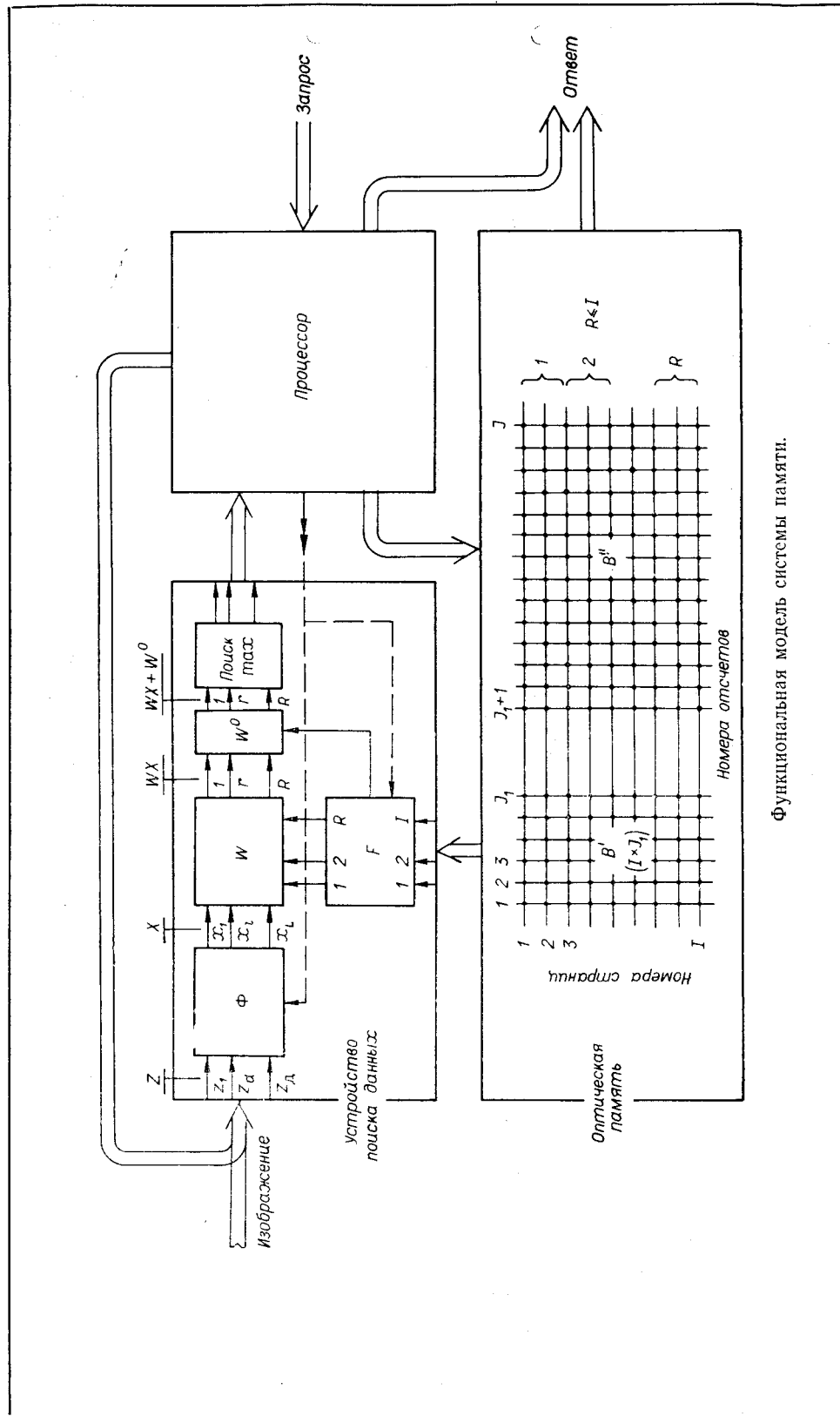
Может показаться, что использование в оптических системах памяти признаков ЗУ приведет к увеличению времени выборки информации и к невосполнимому повышению их стоимости. Однако это далеко не так. При организации в признаковом ЗУ страничной обработки данных время, затрачиваемое на поиск, может быть пренебрежимо малым в сравнении со средним временем доступа в оптический архив, выполняющий функции основной памяти. Такая обработка, как показано ниже, на аналоговом и цифровом уровнях может выполняться оптико-электронными методами. Что касается стоимости АОЗУ, то можно ожидать, что дополнительные средства, требуемые для их создания, будут получены (за счет экономии) в сфере массового применения таких устройств (информационно-справочные службы, библиотеки, производственные и научные архивы, службы перевода с языков, вычислительные центры и т. п.).

Если считать, что начало разработки адресных оптических ЗУ со страничной записью информации совпадает с моментом появления публикаций [2, 3], то первые идеи создания ассоциативного оптического ЗУ на твердом теле были высказаны несколько ранее [15, 16]. Более поздние работы [17—20] расширили представления о возможных методах организации таких ЗУ, однако изложенные в них идеи были слабо связаны со структурами адресных голограммных ЗУ, разрабатываемых в этот период. Указанный недостаток учтен в работах [21—24], где предложены методы организации ассоциативной выборки в сложившихся структурах голограммных ЗУ. Известны попытки применения оптических ассоциативных методов выборки информации при решении задач ИК-спектроскопии [25—28], поиска буквенно-цифровой информации [29], диагностики многопараметрических состояний [30], распознавания изображений [31] и т. п.

Отсюда следует, что по обсуждаемому вопросу существует довольно значительный методический и прикладной научно-технический опыт, который получен при выполнении ряда частных исследований. Напрашивается мысль о необходимости обобщения имеющихся результатов.

Ниже описана функциональная модель оптической системы памяти, в которой этапу выдачи информации, соответствующей запросу, предшествует этап поиска ее адреса. Модель построена для иллюстрации общего подхода к организации выборки по содержанию и выяснения характера преобразований, выполняемых в процессе такой выборки. Обсуждены возможности реализации таких преобразований оптико-электронными методами. При построении модели использованы представления теории принятия решений [32].

Модель системы памяти. Схема системы изображена на рисунке. Она содержит три функционально-различные части: оптическую память, устройство поиска данных и процессор. Запрос вводится в систему на входном языке процессора (язык высокого уровня). В специальных случаях запрос может быть представлен изображением и введен непосредственно в устройство поиска данных. Ответами системы являются сообщения о наличии или отсутствии в памяти информации, соответствующей запросу; адреса ячеек памяти, в которой она хранится; содержимое этих ячеек. Структурной единицей информации, хранимой в ячейке



Функциональная модель системы памяти.

памяти, будем считать многозрядную страницу (массив данных), составной частью которой является описание — «реферат» этой страницы.

Оптическая память используется для хранения информационного массива B , где $B = \|b_{ij}\|$ — матрица, содержащая I векторов B_i , $i=1, 2, \dots, I$, с компонентами b_{ij} , $j=1, 2, \dots, J$. Иначе говоря, матрица B описывает I изображений страниц, каждая из которых содержит J отсчетов. Особенность применяемой памяти (в сравнении с другими известными видами памяти) состоит в том, что отсчеты b_{ij} принимают более чем два значения.

Условимся, что первые из J_1 ($J_1 < J$) компонент каждой из страниц образуют их описания, а остальные $J - J_1$ компонент — информационные слова, подлежащие выборке из памяти. Тогда из описаний страниц

можно образовать матрицу признаков $B' = \|b'_{ij}\|$, $i=1, 2, \dots, I$, $j=1, 2, \dots, J_1$, а из информационных слов — матрицу $B'' = \|b''_{ij}\|$, $i=1, 2, \dots, I$, $j=J_1+1, J_1+2, \dots, J$, которую назовем информационной.

Допускаем, что среди I описаний, образующих строки матрицы B' , имеются совпадающие или «близкие» по содержанию, причем такие, которые в пространстве своих компонент локализуются в R ($R \leq I$) перекрывающихся областях и тем самым допускают разбиение соответствующих им информационных слов на R классов. Очевидно, что количество таких классов будет определять то разнообразие ответов, которое можно получить на выходе рассматриваемой системы памяти. Каждый из классов будем характеризовать набором $L+1$ параметров w_{rl} , $l=1, 2, \dots, L$, и w_r^0 , которые могут быть получены путем обработки описаний соответствующих им информационных слов. В этом случае совокупность векторов W_r с компонентами w_{rl} образует матрицу весов $W = \|w_{rl}\|$, $r=1, 2, \dots, R$, $l=1, 2, \dots, L$, а совокупность параметров w_r^0 — вектор-столбец W^0 . Преобразование (в общем случае нелинейное), с помощью которого из матрицы B' получаются матрица W и вектор W^0 , на рисунке обозначено символом F .

Запрос в устройство поиска данных поступает в виде вектор-столбца Z с компонентами z_d , $d=1, 2, \dots, D$, характеризующими набор признаков, по которым производится формирование слова запроса. Будем считать, что компоненты вектор-столбца X (x_l , $l=1, 2, \dots, L$) вычисляются из компонент вектора Z путем реализации преобразований вида $x_l = \Phi_l(Z)$, где $\Phi_l(Z)$, $l=1, 2, \dots, L$, — совокупность линейно-независимых, действительных, однозначных функций. Очевидно, что в этом случае компоненты вектора X характеризуют систему из L признаков, по которым производится выборка по содержанию. Укажем несколько часто применяемых преобразований:

линейные

$$x_l = \Phi_l(Z) = z_d, \quad l=1, 2, \dots, D; \quad (1)$$

квадратичные

$$x_l = \Phi_l(Z) = z_\gamma^\alpha z_\varepsilon^\beta, \quad \begin{array}{l} \gamma, \varepsilon = 1, 2, \dots, D; \\ \alpha, \beta = 0 \text{ или } 1; \end{array} \quad (2)$$

полиномиальные вида

$$x_l = \Phi_l(Z) = z_{\gamma_1}^{\alpha_1} \dots z_{\gamma_\pi}^{\alpha_\pi}, \quad \begin{array}{l} \gamma_1, \dots, \gamma_\pi = 1, 2, \dots, D; \\ \alpha_1, \dots, \alpha_\pi = 0 \text{ или } 1, \end{array} \quad (3)$$

где π — порядок полинома;
полиномиальные вида

$$x_l = \Phi_l(Z), \quad (4)$$

где $\Phi_l(Z)$ — составляющая произвольной ортогональной системы функций $\{\Phi_l(Z)\}$, $l=1, 2, \dots, L$.

Преобразования вида (1) — (4) наиболее часто выполняются с целями перехода к независимым или информативным признакам, сжатия информации, обеспечения инвариантности к неконтролируемым возмущениям и т. п.

Процесс выборки состоит в вычислении компонент вектор-столбца $\Psi_r(Z)$, $r=1, 2, \dots, R$, из матричного уравнения

$$\Psi(Z) = WX + W^0, \quad (5)$$

предусматривающего взвешивание матрицей весов W вектора признаков X и алгебраическое сложение полученных значений с вектором W^0 . Иначе говоря, компоненты вектора $\Psi(Z)$ определяются из выражений вида

$$\Psi_r(Z) = \omega_{r1}\Phi_1(Z) + \omega_{r2}\Phi_2(Z) + \dots + \omega_{rL}\Phi_L(Z) + \omega_r, \quad (6)$$
$$r=1, 2, \dots, R,$$

являющихся линейными относительно весов.

Далее алгоритм выборки предусматривает выполнение операции поиска максимальных значений, смысл которой вытекает из следующих геометрических соображений. Предположим, что векторам весов W_r , $r=1, 2, \dots, R$, и вектору X в L -мерном пространстве, определяемом их компонентами, соответствуют точки. Тогда решение о «близости» вектора X к вектору W_r можно вывести, например, на основе минимума среднеквадратического расстояния. Согласно [32], этот критерий может быть реализован путем вычисления R компонент вектора $\Psi(Z)$ из (6) с последующим выбором максимального значения. В общем случае максимальные значения могут принять несколько компонент, что характеризует неоднозначность выбора информации из памяти. Функции вида (6), аргументом которых является вектор признаков Z , принято называть решающими [32] или R -мерными функционалами «близости».

Результатом выборки из памяти является либо содержимое страницы r , на которой решающая функция принимает максимальное значение, либо ее номер.

Из рисунка следует, что в отличие от адресного оптического ЗУ ассоциативная система памяти содержит устройство поиска данных, используемое для формирования и хранения векторов W_r , $r=1, 2, \dots, R$, и W^0 , реализации преобразований Φ и F , а также для вычисления функционала (6) с последующим поиском максимальных значений. Часто, однако, в целях упрощения устройства векторы весов W_r формируются заранее и преобразование вида F не выполняется.

Результаты поиска поступают в процессор, функциями которого являются:

трансляция запроса, сформулированного на языке пользователя, на промежуточный «системный» язык признаков компонент вектора Z ;
программное обеспечение сложных многошаговых видов поиска, требующих анализа, хранения и обработки промежуточных результатов;
изменение (при необходимости) вида преобразований Φ и F в процессе выборки информации;

адресная выборка из памяти (выдача содержимого) и формирование ответа на языке пользователя.

Модель системы памяти допускает обобщение на случай параллельной выборки по N различным ключевым словам. Тем самым она приобретает свойства многоканальной системы памяти, обеспечивающей независимый доступ к информационному массиву нескольким пользователям. При многоканальной работе символы Z и X приобретают смысл матриц, составленных из N различных векторов запроса Z_h и X_h , $h=1, 2, \dots, N$. Векторы X_h содержат компоненты $x_{hl} = \Phi_l(Z_h)$, $l=1, 2, \dots, L$,

полученные в результате выполнения преобразования вида Φ над каждым из векторов Z_h . Функционал в этом случае может быть представлен матричным уравнением

$$\begin{aligned} \Psi(Z) &= \|\psi_{rh}\| = WX + W^0, \\ r &= 1, 2, \dots, R; \\ h &= 1, 2, \dots, H, \end{aligned} \quad (7)$$

где $W^0 = \|\omega_{rh}^0\|$ — матрица размерности $R \times H$ с одинаковыми столбцами. Отсюда следует, что в процессе многоканальной выборки каждый из векторов X_h взвешивается матрицей весов. Затем матрица полученных значений складывается с матрицей пороговых коэффициентов и на столбцах результирующей матрицы, у которой номер столбца соответствует номеру канала запроса, отыскиваются элементы с максимальными значениями.

Отметим, что в отдельных случаях процессы преобразования вектора Z и взвешивания полученных признаков матрицей W могут быть совмещены. Так, если необходимо представить вектор Z в пространстве ортогональных функций (4), то решающая функция (6) приводится к виду

$$\begin{aligned} \Psi(Z) &= \|\psi_{rh}\| = W\Phi Z + W^0, \\ r &= 1, 2, \dots, R; \\ h &= 1, 2, \dots, H, \end{aligned} \quad (8)$$

где $L=D$, а $\Phi = \|\Phi_{pq}\|$, $p, q = 1, 2, \dots, D$, — матрица, строки которой описывают D табулированных значений функций разложения (4).

Практически важные частные случаи. Теория принятия решений указывает ряд параметрических методов выбора вида решающих функций и, следовательно, уточнения требуемого характера преобразований векторов признаков Z . Эти методы применимы тогда, когда известно, что описания страниц, составляющие матрицу признаков B' , являются реализациями многомерных случайных процессов и что эти процессы можно характеризовать системой параметров, которые неизвестны. Тогда имеющиеся I реализаций описаний используются для получения оценок этих параметров и тем самым для определения оптимальной (в смысле среднего риска) решающей функции.

Если о системе параметров, характеризующих случайные процессы, ничего неизвестно, то вид решающей функции выбирается эвристическим путем, а матрицы весов определяются методами непараметрического обучения.

Для иллюстрации параметрического метода выбора решающей функции остановимся на двух частных примерах. Пусть известно, что описания страниц каждого из R классов распределены в соответствии с многомерными нормальными законами, ковариантные матрицы которых одинаковы. Тогда из [32] следует, что оптимальная решающая функция будет иметь вид функции

$$\begin{aligned} \psi_r(Z) &= \omega_{r1}z_1 + \omega_{r2}z_2 + \dots + \omega_{rD}z_D + \omega_r^0, \\ r &= 1, 2, \dots, R, \end{aligned} \quad (9)$$

линейной относительно компонент вектора Z . Здесь

$$\omega_{rd} \langle b_{rd} \rangle \quad (10)$$

— оценка математического ожидания компоненты с номером d среди описаний класса r , а

$$\omega_r^0 = -\frac{1}{2D} \sum_{d=1}^D \langle b_{rd} \rangle^2 \quad (11)$$

— половинное значение оценки квадрата математического ожидания класса r . Смысл преобразования Φ в этом случае состоит в умножении единичной матрицы на вектор-столбец Z , а преобразования F — в вычислении оценок математических ожиданий по формулам (10) и (11).

Пусть теперь классы описаний отличаются не только математическими ожиданиями, но и ковариантными матрицами G_r , $r=1, 2, \dots, R$, которые являются симметрическими и положительно определенными. Тогда оптимальная решающая функция становится квадратичной относительно компонент вектора Z и принимает вид

$$\psi_r(Z) = -\frac{1}{2} [(Z - \langle B_r \rangle)^T G_r^{-1} (Z - \langle B_r \rangle)] + w_r^0, \quad (12)$$

$$r=1, 2, \dots, R,$$

где $\langle B_r \rangle$ — оценка вектора математического ожидания описаний класса r (компоненты вектора определяются по формуле (10), G_r^{-1} — обратная ковариантная матрица описаний класса r , $w_r^0 = \log p_r - \frac{1}{2} \log |G_r|$ — постоянная класса r , выраженная через вероятность p_r его появления и определитель ковариантной матрицы, а t — знак транспонирования [32].

Функция (12) преобразуется к эквивалентному, но более наглядному виду

$$\psi_r(Z) = \sum_{d=1}^D q_{dd}^{(r)} \tilde{z}_d^2 + \sum_{d=1}^{D-1} \sum_{k=d+1}^D q_{dk}^{(r)} \tilde{z}_d \tilde{z}_k + \sum_{d=1}^D q_d^{(r)} \tilde{z}_d + w_r^0, \quad (13)$$

$$r=1, 2, \dots, R,$$

где \tilde{z}_d , $d=1, 2, \dots, D$, — центрированные компоненты вектора Z , а $q_{dd}^{(r)}$, $q_{dk}^{(r)}$ и $q_d^{(r)}$ — коэффициенты при переменных вида \tilde{z}_d^2 , \tilde{z}_d , \tilde{z}_k , \tilde{z}_d , получаемые путем матричного умножения (12). Можно видеть, что строка r матрицы весов W в рассматриваемом случае содержит D весов при квадратичных, $\frac{D(D-1)}{2}$ весов при перекрестных и D весов при линейных членах. Общее число весов в строке $L = 2D + \frac{D(D-1)}{2}$. Кроме того, из (13) следует, что преобразование Φ реализуется для получения компонент вида \tilde{z}_d^2 , $\tilde{z}_d \tilde{z}_k$ и \tilde{z}_d , а преобразование F — для получения соответствующих им значений весов $q_{dd}^{(r)}$, $q_{dk}^{(r)}$ и $q_d^{(r)}$, включая вычисление веса w_r^0 .

Логические функционалы. Функционалы вида (5) имеют логические модификации, применяемые при поиске информации цифровыми методами. Рассмотрим отдельные виды таких функционалов. Для этого предположим, что числовые и независимые компоненты векторов X и W_r можно представить в виде N разрядных двоичных чисел:

$$x_l = \{x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lN}\}, \quad l=1, 2, \dots, L; \quad (14)$$

$$r=1, 2, \dots, R;$$

$$w_{rl} = \{w_{rl1}, w_{rl2}, \dots, w_{rlN}\}, \quad l=1, 2, \dots, L,$$

где x_{ln} и w_{rln} принимают значения 1 и 0, а $x_l = \Phi_l(Z)$.

Прямой аналогией функционала (5) является логическая функция

$$\psi_r(Z) = \overline{f_{r1}} \vee \overline{f_{r2}} \vee \dots \vee \overline{f_{rL}}, \quad (15)$$

$$r=1, 2, \dots, R,$$

где « \vee », « $\overline{}$ » — символы логических операций сложения и отрицания, а f_{rl} — логическая функция, зависящая от вида поиска. Аргументы этой функции — разряды сравниваемых двоичных чисел (14).

При простом поиске адресов страниц, удовлетворяющих условию совпадения (несовпадения) признаков запроса и описаний страниц,

f_{rl} имеет смысл функции равнозначности

$$\bigwedge_{n=1}^N (x_{ln}\omega_{rln} + \bar{x}_{ln}\bar{\omega}_{rln}), \quad (16)$$

где « \bigwedge » — символ логической операции умножения. Функция (16) принимает значение 1, если запрос (вектор X) совпадает с описанием r -й страницы (вектор W_r) по двоичным разрядам всех одноименных признаков, и значение 0, если хотя бы один из разрядов любого из признаков не совпадает.

Более сложные задачи поиска решаются с использованием других специализированных функций f_{rl} . Ввиду сложности и ненаглядности этих функций ограничимся указанием их общих свойств.

Если x_l — фиксированное запросом значение признака l , то при поиске адресов по неравенству признаков применяются функции

$$f_{rl}^6(x_l; \omega_{rl}) \text{ и } f_{rl}^M(x_l; \omega_{r,l}), \quad (17)$$

которые составляются таким образом, что они принимают значение 1 при всех индексах r , для которых выполняются соответственно условия $\omega_{rl} > x_l$ («больше») и $\omega_{rl} < x_l$ («меньше»), и значение 0, если указанные условия не выполняются.

Пусть теперь Ω_1 — множество адресов, удовлетворяющих условию «больше» при $x_l = x_l'$, а Ω_2 — множество адресов, удовлетворяющих условию «меньше» при $x_l = x_l''$, причем $x_l'' > x_l'$. Тогда множество адресов, удовлетворяющих условию $x_l' < x_l < x_l''$, находится с помощью операции логического умножения множеств Ω_1 и Ω_2 . Таким образом решается задача поиска адресов страниц, признаки которых находятся в заданном диапазоне.

Поиск страниц, у которых признак l имеет максимальное или минимальное значение, осуществляется с помощью функций

$$\begin{aligned} f_{rl}^{\max}(\omega_{rl}; \omega_{1l}, \dots, \omega_{(r-1)l}, \omega_{(r+1)l}, \dots, \omega_{Rl}); \\ f_{rl}^{\min}(\omega_{rl}; \omega_{1l}, \dots, \omega_{(r-1)l}, \omega_{(r+1)l}, \dots, \omega_{Rl}). \end{aligned} \quad (18)$$

Функции f_{rl}^{\max} и f_{rl}^{\min} равны 1 при выполнении соответственно условий

$$\begin{aligned} \omega_{rl} > \omega_{1l}, \dots, \omega_{(r-1)l}, \omega_{(r+1)l}, \dots, \omega_{Rl}, \\ \omega_{rl} < \omega_{1l}, \dots, \omega_{(r-1)l}, \omega_{(r+1)l}, \dots, \omega_{Rl}. \end{aligned}$$

В силу независимости признаков ω_{rl} , $l=1, 2, \dots, L$, эти функции можно выразить через функции (16) и представить в виде

$$\begin{aligned} f_{rl}^{\max} = \bigwedge_{t=1}^R f_{rt}^6(\omega_{rl}; \omega_{tl}); \quad f_{rl}^{\min} = \bigwedge_{t=1}^R f_{rt}^M(\omega_{rl}; \omega_{tl}), \\ r=1, 2, \dots, R; \quad r \neq t. \end{aligned}$$

Упорядоченная выборка адресов в порядке возрастания (или убывания) значений признака l , начиная с некоторого заданного значения x_l , реализуется путем вычисления функционала (15) с функциями вида (17), который позволяет получить множество Ω_1 (или Ω_2) адресов, удовлетворяющих условию «больше» (или «меньше»), с последующей выборкой из Ω_1 (или Ω_2) адресов с минимальным (или максимальным) значением признака l . Найденный адрес из множества Ω_1 (или Ω_2) «вычеркивается», и повторяется поиск следующего минимального (или максимального) адреса в соответствии с (18).

Частными задачами упорядоченной выборки являются задачи поиска ближайшего большего и ближайшего меньшего.

Путем маскирования в функционале (15) признаков (в том числе разрядов этих признаков в функциях (16) — (18)) можно решать задачи

поиска как по отдельным признакам, так и по их произвольным комбинациям. Этим цифровые методы поиска выгодно отличаются от аналоговых.

Аппаратные методы вычисления функционалов «близости». Возможности создания и применения АОЗУ зависят в сильной степени от наличия параллельных или параллельно-последовательных оптико-электронных аппаратных средств для вычисления многомерных функционалов «близости», используемых при поиске. Достаточно сказать, что трудности решения проблемы связей явились главной причиной довольно скромного распространения ассоциативных ЗУ на электронных, полупроводниковых и криогенных элементах.

В последние годы предложены когерентные и некогерентные оптические системы для выполнения линейных интегральных преобразований общего вида, т. е. систем, импульсный отклик которых произвольным образом зависит от координат входной и выходной плоскостей [33—46]. Такие системы в отличие от известных содержат оптическую память с матричной или линейной организацией. Двумерные «сечения» импульсного отклика регистрируются на фотоносителе оптическим или голографическим путями, причем так, что каждый полутоновой (в общем случае) элемент входного изображения, проектируемого на оптическую память, мог восстановить свое «сечение». Тогда распределение интенсивности света в выходной плоскости системы пропорционально результату взвешенного суммирования «сечений».

Системы, реализующие операции умножения матрицы на вектор-строку [21, 22, 33] и матрицы на матрицу [23, 38—40, 46], предназначены для параллельного аналогового вычисления многомерных функционалов типа скалярного произведения (9). Возможная мерность функционалов — 10^4 , количество бит в изображении запроса — 10^3 — 10^4 . Матрица весов в этом случае регистрируется в модуле голограммной памяти. Перестройка матрицы весов достигается путем смены модуля.

Системы, реализующие операцию аналогового умножения трех матриц [43—45], обладают большими функциональными возможностями. Кроме многомерных ($\sim 10^4$) функционалов типа скалярного произведения (9), они позволяют вычислять многомерные ($\sim 10^2$) функционалы типа квадратичной формы $\tilde{Z}^T G^{-1} \tilde{Z}$ (два первых члена в выражении (13)). Матрица весов и обратная ковариантная матрица представляются на транспарантах с соответствующими функциями пропускания. Особая ситуация возникает тогда, когда переход от вектора Z к вектору X происходит путем разложения по произвольной ортогональной системе функций. В этом случае рассматриваемые оптические системы применены для аналогового вычисления многомерных функционалов вида (8).

Изучены и экспериментально подтверждены возможности выполнения многоканального поиска в оптических системах умножения матриц [38, 47].

Функционалы, требующие более сложных (нелинейных) преобразований вектора Z , можно вычислять путем оптимального перераспределения функций обработки между оптическими и электронными средствами и применения итерационных методов.

Пример находим в работах [48, 49], где аналого-цифровым способом произведено вычисление ранговых и знаковых функционалов. В разработанном оптико-электронном процессоре получение исходных признаков изображения производится в оптической системе, а операции обработки признаков и принятия решения выполняются в ЭВМ. Время вычислений сокращается примерно на порядок.

Разработаны эффективные (по быстродействию) оптико-электронные цифровые методы поиска на основе логического многомерного функционала (15) с учетом специализированных видов (16)—(18) входящих в него функций [24]. Аппаратная реализация этих методов преду-

считывает использование, кроме упомянутых ранее оптических систем, специализированных странично-организованных электронных процессоров с оптическим входом. Вычисление логического функционала производится путем итераций. В этом случае аппаратные средства сочетают в себе сравнительно большую емкость оптической памяти, быстродействие оптико-электронных и гибкость электронных методов обработки информации.

Таким образом, современная оптикоэлектроника располагает довольно разнообразным арсеналом аппаратных средств для вычисления многомерных функционалов. Это стало возможным благодаря исследованиям последних лет, позволившим предложить ряд новых оптических и оптико-электронных систем, сочетающих функции хранения и параллельной обработки страниц информации на аналоговом, аналого-цифровом и цифровом уровнях.

Заключение. Организация в оптических системах памяти поиска информации по «смысловому» запросу позволит повысить степень автономности и расширить сферу применений таких устройств, в которых могут быть эффективно использованы уникальные свойства оптической памяти: возможности смешанного хранения и отображения информации, многоканального поиска, многоканальной адресации к памяти и страничной обработки информации. Накопленный опыт разработки оптических ЗУ (большого и малого объемов) и разнообразие многомерных функционалов, эффективно вычисляемых оптико-электронными методами, позволяют надеяться, что задача создания оптических ЗУ с выборкой по содержанию является реальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Di Chen, J. David Zook. An overview of optical data storage.—“Technology. Proc. of the IEEE”, 1975, vol. 63, № 8, p. 1207—1230.
2. F. M. Smits, L. E. Gallager. Design considerations for a semipermanent optical memory.—“Bell Syst. Techn. J.”, 1967, vol. 46, p. 1267—1278.
3. L. K. Anderson. Holographic optical memory for bulk data storage.—“Bell Lab. Rec.”, 1968, vol. 46, p. 319—325.
4. L. K. Anderson. Application of holographic optical techniques to bulk memory.—“IEEE Trans. Magn.”, 1971, vol. MAG-7, p. 601—605.
5. J. Lipp, J. L. Reynolds. A high capacity holographic storage system, in Applications of holography. E. S. Barreketet et al., Eds. N. Y., Plenum Press, 1971, p. 377—388.
6. J. A. Rajchman. An optical read-write mas memory.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 2269—2271.
7. W. C. Stewart, W. S. Cosentino. Optics for a read-write memory.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 2271—2274.
8. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, С. М. Наумов, Л. С. Соколова. Возможности применения методов голографии для создания новых типов запоминающих устройств.—«Радиотехника и электроника», 1969, № 1, с. 115—123.
9. A. L. Mikaeliane, V. I. Bobrinev, S. M. Naumov, L. Z. Sokolova. Design principles of holographic memory devices.—“IEEE J. Quantum Electron.”, 1970, vol. QE-6, p. 193—199.
10. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, А. А. Аксельрод, С. М. Наумов, М. М. Колобова, Э. А. Засовин, К. И. Куштанин, В. В. Харитонов. Голографические запоминающие устройства с записью информации массивами.—«Квантовая электроника», 1971, № 1, с. 79—84.
11. Л. П. Крайзмер, Д. А. Бородаев, Л. И. Гутенмахер, Б. П. Кузьмин, И. Л. Смелянский. Ассоциативные запоминающие устройства. Л., «Энергия», 1967.
12. И. В. Прангишвили, Г. М. Попова, О. Г. Смородинова, А. А. Чудин. Однородные микрoэлектронные ассоциативные процессоры. М., «Сов. радио», 1973.
13. И. В. Прангишвили. Основные тенденции развития управляющей вычислительной техники.—«Измерения. Контроль. Автоматизация», 1975, № 1, с. 43—50.
14. Е. И. Ильяшенко, В. Ф. Рудаков. Ассоциативные запоминающие устройства на магнитных элементах. М., «Энергия», 1975.
15. P. J. Van Heerden. Theory of optical information storage in solids.—“Appl. Opt.”, 1963, vol. 2, № 4, p. 393—400.
16. P. J. Van Heerden. Optical associative memory system. U. S. Patent, № 3492652, 1966, Dec. 30.

17. D. Gabor. Character recognition by holography.—“Nature”, 1965, vol. T-44, p. 16—17.
18. D. Gabor. Associative holographic memories.—“IBM J. Res. Devel.”, 1969, vol. 1, p. 156—159.
19. M. Sakaguchi, N. Nishida, T. Nemoto. A new associative memory system utilizing holography.—“IEEE Trans. Comput.”, 1970, vol. C-19, p. 1174—1181.
20. M. Sakaguchi, N. Nishida. Large capacity associative memory employing holography. U. S. Patent, № 3704929, 1972, Dec. 5.
21. И. С. Гибин, М. А. Гофман, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Ассоциативная выборка информации в голограммных запоминающих устройствах.—«Автометрия», 1973, № 5, с. 12—18.
22. G. R. Knight. Page-oriented associative holographic memory.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, № 4, p. 904—912.
23. I. S. Gibin, P. E. Tverdokhleб. Information processing in optical system of holographic memory device.—The Proc. of the American-Soviet Seminar an Opt. Inform. Processing, N. Y., Plenum Publish Press, 1975.
24. И. С. Гибин, М. А. Гофман, С. Ф. Кибирев, П. Е. Твердохлеб. Исследование одного варианта голограммной признаковой памяти.—«Автометрия», 1976, № 6, с. 24—35.
25. Г. А. Воскобойник, И. С. Гибин, В. П. Коронкевич, П. Е. Твердохлеб. Устройство с голограммной памятью для поиска веществ по их ИК-спектрам.—«Опт. и спектр.», 1971, т. XXX, вып. 6, с. 1152—1156.
26. Г. А. Воскобойник, И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб. Применение когерентных оптических вычислительных устройств для решения задач информационного поиска.—«Автометрия», 1971, № 1, с. 77—81.
27. Г. А. Воскобойник, Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический когерентный коррелятор.—Авт. свид-во № 332474 (приор. от 7.VII. 1970), БИ, 1972, № 10.
28. Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб. Способ получения взаимно-корреляционных функций изображений.—Авт. свид-во № 300883 (приор. от 4.II. 1970), БИ, 1971, № 13.
29. Kouyama Jiro, Sumi Masao. Оптическая система поиска информации “PANDORA”.—“Electron. Commun. Lab. Techn. J.”, 1973, vol. 22, № 8, p. 2035—2042.
30. В. А. Антонов, Ю. А. Быковский, А. И. Ларкин, А. А. Маркилов, С. Н. Стариков, А. А. Трещун. Голографическая диагностика многопараметрических состояний.—II Всес. конференция по голографии. Тезисы докладов. Ч. 1. Киев, Изд. Ин-та физики АН УССР, 1975.
31. Ж.-Ш. Вьено. Аналоговые методы обработки оптической информации.—«Автометрия», 1974, № 1, с. 23—31.
32. Н. Нильсон. Обучающиеся машины. М., «Мир», 1967.
33. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида.—«Автометрия», 1972, № 6, с. 88—91.
34. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб, О. И. Потатуркин. Способ обобщенного спектрального анализа.—Авт. свид-во № 369587 (приор. от 3.VIII. 1971), БИ, 1973, № 10.
35. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Способ обобщенного спектрального анализа.—Авт. свид-во № 391414 (приор. от 17.III. 1972), БИ, 1973, № 31.
36. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.—«Автометрия», 1972, № 5, с. 3—10.
37. И. С. Гибин, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Способ обобщенного спектрального анализа.—Авт. свид-во № 428229 (приор. от 25.XI. 1971), БИ, 1974, № 18.
38. Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб. Умножение матриц оптическим методом.—«Автометрия», 1972, № 6, с. 24—30.
39. O. Bryngdahl. Optical map transformations.—“Opt. Com.”, 1974, vol. 10, № 2, p. 164—168.
40. O. Bryngdahl. Geometrical transformations in optics.—“JOSA”, 1974, vol. 64, № 8, p. 1092—1099.
41. И. С. Гибин, М. А. Гофман, Ю. В. Чугуй. Обобщенный спектральный анализ изображений с использованием голографического метода формирования кодирующей пластины.—«Автометрия», 1975, № 3, с. 77—85.
42. Yu. V. Chugui, B. E. Krivenkov, P. E. Tverdokhleб. The analysis of images by Hadamard optical transform.—“Appl. Opt.”, 1975, vol. 14, № 8, p. 1829—1834.
43. Б. Е. Кривенков, С. В. Михляев, П. Е. Твердохлеб. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований.—«Автометрия», 1975, № 3, с. 90—98.
44. С. В. Михляев, Ю. В. Чугуй. Параллельно-последовательный анализ изображений некогерентным оптическим методом.—«Автометрия», 1975, № 5, с. 3—10.
45. Yu. V. Chugui, B. E. Krivenkov, S. V. Mikhlyayev, P. E. Tverdokhleб. Non-coherent optical system for processing of images and signals.—The Proc. of

- the American-Soviet Seminar on Optical Information Processing. N. Y., Plenum Publish Corp., 1975.
46. W. Schneider, W. Fink. Incoherent optical matrix multiplication.—“Optica Acta”, 1975, № 11, p. 879—889.
 47. М. А. Гофман, С. Ф. Кибирев, Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Многоканальный поиск информации в некогерентных оптических системах памяти.—«Автометрия», 1976, № 6, с. 48—54.
 48. О. М. Карпова, Е. С. Нежевенко, Г. Д. Уманцев. Распознавание изображений известной формы на фотоснимках.—«Автометрия», 1975, № 3, с. 68—73.
 49. Ф. Ф. Веряскин, Л. В. Выдрин, В. Г. Давыдов, Т. Н. Мантуш, Е. С. Нежевенко, Б. Н. Панков, П. Е. Твердохлеб. Оптико-электронный процессор для распознавания изображений.—«Автометрия», 1975, № 3, с. 73—77.

Поступила в редакцию 15 июля 1976 г.

УДК 621.391.156

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, Б. И. СПЕКТОР

(Новосибирск)

АФИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

При решении задач распознавания и идентификации двумерных изображений в когерентно-оптических системах значительные трудности возникают при необходимости обеспечить инвариантность к аффинным преобразованиям (ориентации, масштабу и т. п.) в реальном времени.

Существует ряд способов, которыми пользуются в этом случае. Их можно разделить на две основные группы [1]. К первой группе относятся способы, в которых применяются механические узлы смещения, вращения, смены фильтров и т. д. Ко второй группе относятся способы, в которых в систему обработки вводится мультипликация или многоканальность.

Основными недостатками способов первой группы являются малое быстродействие и наличие вибрации системы, вызываемое механическими смещениями узлов. При использовании способов второй группы необходимо иметь несколько независимых каналов, что в конечном счете снижает информационную емкость и пропускную способность системы распознавания.

Вообще говоря, в настоящее время в оптических системах идентификации, распознавания и поиска изображений с неизвестными параметрами ориентации и масштаба существует противоречие между скоростью вычисления решающей функции в оптической системе ($\sim 10^{-8}$ с) и скоростями смены параметров ориентации и масштаба (в некоторых случаях до 10^{-4} — 10^{-5} с). Отметим, что характерные времена фотоэлектрических устройств считывания уже находятся на уровне 10^{-8} ÷ 10^{-10} с (ФЭУ, PIN-диоды).

В данной работе рассмотрен один из возможных путей устранения указанного выше противоречия, основанный на применении оптических систем с обратной связью. Ранее [2] нами была рассмотрена и подтверждена возможность применения таких оптических систем для нелинейной обработки изображений.

Рассмотрим более общую, чем в [2], систему оптической обработки изображений, включающую замкнутую и разомкнутую части (рис. 1). Луч лазера 1 расширяется коллиматором 2, 3 и освещает изображение, которое, фокусируясь объективом 4, через светоделительный клин 5