

длин волн, включая интервал 0,4—0,9 мкм. Хорошая прозрачность клапанов $t_{кл} = 0,7$ и наличие внутренней маски подтверждают перспективность использования транспаранта для целей голографической записи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митикадзу К., Кейити К. Жидкокристаллическое отображающее устройство.— Ое Буцури, 1978, т. 47, № 3, с. 254.
2. Волин В. И. и др. Жидкокристаллическая матричная панель.— Техника средств связи. Сер. Радиоизмерит. техника, 1979, вып. 5, с. 85—89.
3. Мцкерадзе Г. Ш. и др. Запись голограмм с помощью жидкокристаллического транспаранта 128×128 элементов.— Квант. электроника, 1978, № 7, с. 1891.
4. Alt P. M., Pleshko P. Scanning Limitations of Liquid-Crystal Displays.— IEEE Trans. on El. Dev., 1974, vol. ED-21, p. 146.
5. Воробьев А. В. и др. Запись голограмм излучением полупроводникового лазера с голографическим селектором.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 12, с. 2741.

В. Ф. СОЛОМАТИН

(Ленинград)

ТЕОРИЯ АССОЦИАТИВНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЗАПИСЬЮ ИНФОРМАЦИИ

В современных ЗУ обычно запись осуществляется локально: в одном запоминающем элементе (ЗЭ) хранится одна величина. Результаты исследования памяти мозга, которая отличается высокой надежностью (не смотря на то что нейроны ненадежны и работают при наличии помех), высокой плотностью записи и работают при наличии помех), что в мозгу запись осуществляется распределенно, ассоциативно, а организация памяти мозга является вероятностно-статистической [1]. Цель настоящей работы — попытаться выяснить, каким образом указанные принципы организации памяти мозга могут быть реализованы в технических ЗУ и какие возможности открывает такая реализация для повышения эффективности кибернетических систем.

Общие замечания. При распределенной записи одна величина, подаваемая на вход ЗУ, записывается в нескольких ЗЭ. Величина $q_m^{(N)}$, хранимая в m -м ЗЭ, после записи N ассоциаций в общем случае зависит от значений определенных компонент нескольких векторов (или кодов). Свойство ассоциативности памяти означает, что ее следы формируются в результате одновременного поступления двух (или нескольких) объектов и что в дальнейшем при предъявлении на входе одного из записанных объектов памяти (в ЗУ — кодов) на выходе возникает «изображение» (код) объекта памяти, запомненного вместе с первым. В этом смысле адресное ЗУ ассоциативно, а обычное ассоциативное ЗУ (АЗУ) [2] не ассоциативно, поскольку в нем можно «ассоциировать» коды, предъявляемые в разное время. В АЗУ фактически ассоциируются не код-признак и информационный код, а каждый из этих кодов с сигналом, выделяющим ячейку ЗУ.

Процесс записи в ЗУ различных типов формально можно представить как запись произведения двух функций: ключевой g и информационной f . При обычной ячейечной организации ЗУ функция $f(z_{ij})$ (z — ЗЭ, i — номер ячейки, j — номер разряда) одинакова для всех i , а $g(z_{ij})$ — для всех j , причем

$$g(z_{ij}) = \delta_{im} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq m, \\ 1 & \text{при } i = m, \end{cases} \quad (1)$$

где m — номер ячейки, в которую производится запись.

Таким образом, при адресной записи функция g не равноправна с функцией f , она лишь запрещает запись в определенные ЗЭ.

Коононом рассмотрен случай, когда функции f и g равноправны [3] (это разновидность распределенной записи):

$$g(z_{ij}) = a_i, f(z_{ij}) = b_j.$$

Здесь a_i — i -я компонента вектора A ; b_j — j -я компонента вектора B . Произведения $a_i b_j$, соответствующие разным векторам, записываются с наложением. Главный недостаток такого способа записи — затрудненность избирательного считывания.

Функции g и f являются равноправными и при голографической записи [4]. Избирательность считывания при записи с наложением достигается благодаря определенному выбору функций g и f , описывающих в данном случае когерентные световые волны в плоскости голограммы. При построении рассмотренных здесь корреляционных ЗУ (КЗУ) использовалась аналогия между свойствами голограммы и свойствами следов памяти в мозгу, а также было учтено то, что в мозгу отсутствуют гармонические волновые поля.

Аналитическое описание КЗУ. Схема КЗУ представлена на рис. 1, на котором 1 и 2 — две группы входов, 3 и 7 — сумматоры, 4 и 6 — умножители, 5 — многоуровневые или аналоговые накапливающие ЗЭ, 8 и 9 — входы для сигналов включения записи и считывания. Связанные между собой два сумматора 3, умножители 4 и 6 и ЗЭ 5 образуют ассоциирующий элемент (АЭ). При записи на две группы входов ЗУ 1 и 2 подаются векторы A и B с компонентами a_{1i} и b_{1j} . На выходах пары сумматоров 3 m -го АЭ формируются сигналы a_{2m} и b_{2m} :

$$a_{2m} = \sum_i a_{1i} w_{im}, \quad (2)$$

$$b_{2m} = \sum_j b_{1j} v_{jm}, \quad (3)$$

где w_{im} — вес связи от i -го входа первой группы входов к m -му АЭ, v_{jm} — вес связи от j -го входа второй группы входов к m -му АЭ.

Таким образом, в ЗУ компоненты векторов A и B представляются дискретными функциями $a_{1i} w_i(m)$ и $b_{1j} v_j(m)$, где индекс m записан как дискретный аргумент. Умножители 4 перемножают величины a_{2m} и b_{2m} , и результат запоминается в ЗЭ 5. После записи N ассоциаций в ЗЭ хранятся величины

$$q_m^{(N)} = \sum_{n=1}^N a_{2m}^{(n)} b_{2m}^{(n)} \quad (4)$$

(n — номер ассоциации).

При считывании предъявляется вектор $A^{(l)}$. В умножителях 6 величины $a_{2m}^{(l)}$ умножаются на $q_m^{(N)}$. На выходах выходных сумматоров 7 формируются величины $b_{3k}^{(l)}$:

$$b_{3k}^{(l)} = \sum_m a_{2m}^{(l)} q_m^{(N)} v'_{mk}, \quad (5)$$

где v'_{mk} — вес связи от m -го АЭ к k -му выходному сумматору.

Рассмотрим случай, когда при записи в первой группе входов активируется только один вход. Используя (2)–(5), получаем

$$b_{3k}^{(l)} = \sum_n \sum_j a_{1i}^{(l)} a_{1n}^{(n)} b_{1j}^{(n)} \sum_m w_{lm} w_{nm} v_{jm} v'_{mk} \quad (6)$$

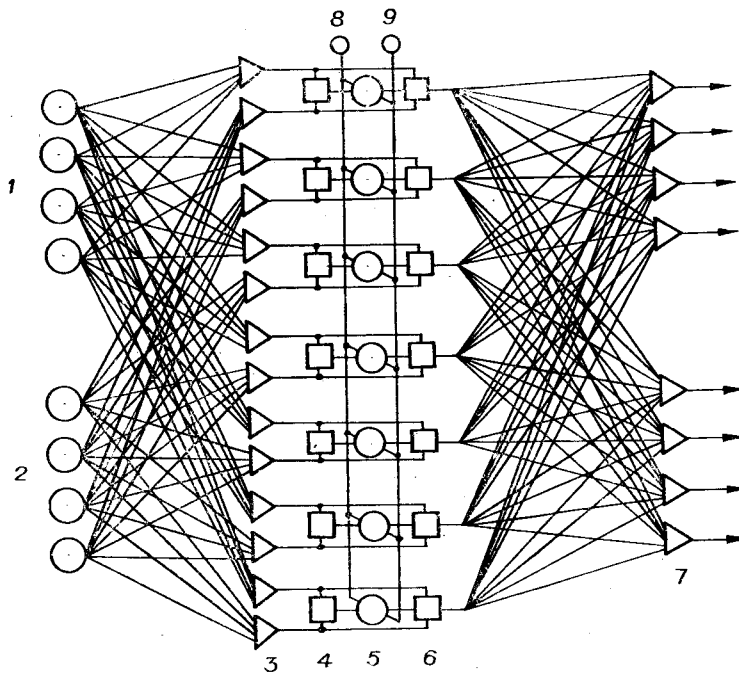


Рис. 1.

(входные элементы первой группы перенумерованы в порядке их активирования; предполагается, что один элемент не активизируется дважды).

Если выполнять условие

$$\sum_m w_{lm} w_{nm} v_{jm} v_{mk}' = \delta_{ln} \delta_{jk}, \quad (7)$$

то после суммирования в (6) можно получить $b_{zk}^{(l)} = (a_{zl}^{(l)})^2 b_{zk}^{(l)}$, т. е. при активировании l -го входа первой группы на выходе ЗУ восстанавливается (с точностью до постоянного множителя) l -й вектор $B^{(l)}$.

Нахождение весов, удовлетворяющих условию (7), представляет собой трудноразрешимую задачу. Избежать трудностей, связанных с заданием весов, можно, взяв в качестве функций $w_i(m)$ и $v_j(m)$ реализации некоррелированных случайных функций с математическим ожиданием, равным нулю. В этом случае условие (7) может быть удовлетворено точно для математического ожидания суммы, а для отдельных реализаций оно выполняется приближенно и с тем меньшей относительной ошибкой, чем больше число АЭ.

В качестве указанных реализаций можно взять псевдослучайные последовательности величин $+1$ и -1 . Если при этом $a_{li}^{(n)} = 1$ и $b_{lj}^{(n)} = \pm 1$ то, как можно показать (полагая веса связей случайными),

$$\mathcal{M} [b_{zk}^{(l)}] = M b_{zk}^{(l)}, \quad D [b_{zk}^{(l)}] \simeq MIN,$$

где \mathcal{M} — символ математического ожидания, D — символ дисперсии, M — число АЭ, I — число компонент векторов $B^{(n)}$, N — число запомненных векторов.

Если входы ЗУ первой группы активизируются от дешифратора адресных кодов, то мы получаем адресное КЗУ. Более практичная схема КЗУ приведена на рис. 2 [5]. Здесь в ЗУ вместо дешифратора введен специальный блок — декоррелятор. На рис. 2 показаны: 1 — регистр признака (или адресный регистр), 2 — декоррелятор, 3 — информационный регистр, 4 и 8 — сумматоры, 5 и 7 — умножители, 6 — ЗЭ, 9 — пороговые элементы.

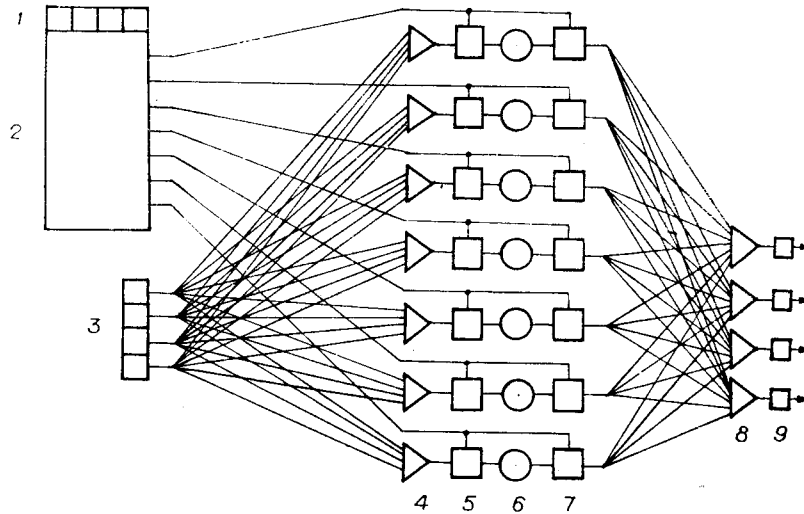


Рис. 2.

Если в ЗУ по схеме рис. 1 после ассоциирования векторов A и B при считывании предъявить вместо A вектор C , то

$$\mathcal{M}[b_{3k}] = (2d - I)Mb_{1k}, \quad (8)$$

d — число совпавших компонент у векторов A и C .

Оценка емкости КЗУ. Специфика КЗУ заключается в том, что в исправном ЗУ возникают шумы считывания вследствие случайного характера связей и взаимного влияния записей. Емкость КЗУ следует определять из условия

$$p_{\text{ош}} = p_{\text{доп}}. \quad (9)$$

Здесь $p_{\text{ош}}$ — вероятность ошибки при считывании, $p_{\text{доп}}$ — заданная допустимая вероятность ошибки.

Условие (9) для случая адресного КЗУ приводит к уравнению

$$\Phi(-M/\sqrt{MN_1}) = p_{\text{доп}}/N_1, \quad (10)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

$N_1 = NI$, N — число запомненных двоичных кодов, I — разрядность кодов. (Двоичные знаки представляются величинами $+1$, -1 .) Результаты решения уравнения (10) на ЭВМ представлены в таблице. Из нее следует, что максимальное число двоичных знаков, которые могут быть запомнены в адресном КЗУ, в 5—20 раз меньше числа АЭ.

Особые свойства и функциональные возможности КЗУ. Одно из главных преимуществ КЗУ — резкое снижение требований к ЗЭ в отношении допусков на значения их параметров и наличия дефектов. Это открывает возможность принципиального скачка в уменьшении размеров

$p_{\text{доп}}$	M				
	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
10^{-5}	5	39	341	$2,98 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^4$
10^{-4}	5	47	397	$3,40 \cdot 10^3$	$2,97 \cdot 10^4$
10^{-3}	7	59	473	$3,96 \cdot 10^3$	$3,40 \cdot 10^4$
10^{-2}	11	75	583	$4,73 \cdot 10^3$	$3,96 \cdot 10^4$
10^{-1}	17	10^2	751	$5,84 \cdot 10^3$	$4,73 \cdot 10^4$

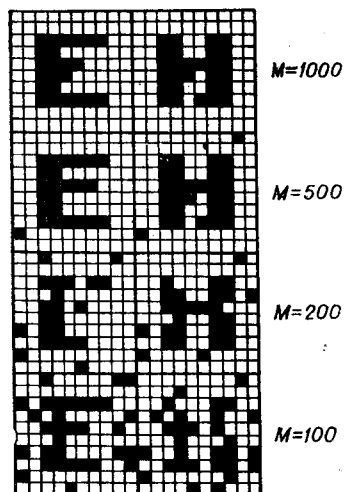


Рис. 3.

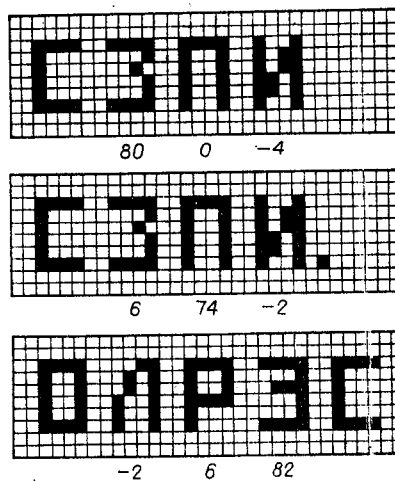


Рис. 4.

ЗЭ и снижения их стоимости. При использовании КЗУ снимается проблема распределения памяти. Запись и считывание отдельного кода осуществляются так, как если бы записи других кодов отсутствовали. КЗУ наилучшим образом подходит для использования в многопрограммных, многопроцессорных и многоканальных системах. Они позволяют осуществлять одновременную запись по нескольким адресам. В КЗУ возможны обмены емкости на достоверность, быстродействия на достоверность, емкости на быстродействие. В них происходит автоматическая адаптация к длине запоминаемых кодов.

Недостатками КЗУ являются низкая емкость в расчете на один ЗЭ и необходимость применения аналоговых или многоуровневых ЗЭ (могут быть предложены способы увеличения емкости КЗУ).

КЗУ может быть построено с использованием методов голографии [6].

Автором была разработана программная модель адресного КЗУ. Расчеты на ЭВМ БЭСМ-3М позволили подтвердить правильность оценок емкости КЗУ. На рис. 3 демонстрируется возможность увеличения удельной емкости КЗУ при запоминании организованных изображений. Считываемые буквы «Е» и «Н» уверенно распознаются при $M = 500$, в то время как для безошибочного считывания должно быть $M = 2000$.

На основе КЗУ могут быть построены классифицирующие устройства с использованием в качестве меры сходства скалярного произведения векторов и опознающие устройства, особенностью которых является то, что требуемое число ЗЭ не зависит непосредственно от числа компонент опознаваемых векторов (это дает возможность уменьшить число ЗЭ). На рис. 4 приведены опознававшиеся изображения и величины выходных сигналов в программной модели опознающего устройства. Число ЗЭ равно 100. (При локальной записи для точного опознавания трех произвольных изображений на использованном в модели рецепторном поле необходимо 960 ЗЭ).

КЗУ целесообразно применять в многопрограммных, многопроцессорных и многоканальных системах с общей памятью, а также в информационно-поисковых системах, распознающих устройствах, автономных роботах, в системах искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крайзмер Л. П., Матюхин С. А., Майоркин С. Г. Память кибернетических систем.— М.: Сов. радио, 1971.
2. Крайзмер Л. П. и др. Ассоциативные запоминающие устройства.— Л.: Энергия, 1967.

3. **Cohonen T.** Correlation Matrix Memories.—IEEE Trans. on Computers, 1972, vol. C-21, N 4.
4. **Сороко Л. М.** Основы голографии и когерентной оптики.— М.: Наука, 1971.
5. **Соломатин В. Ф.** Запоминающее устройство. (Автор. свид-во № 491999).— БИ, 1975, № 42.
6. **Соломатин В. Ф.** Ассоциативное запоминающее устройство. (Автор. свид-во № 464613).— БИ, 1975, № 11.

*Поступила в редакцию 24 июля 1978 г.;
окончательный вариант — 27 ноября 1979 г.*

УДК 7.784

С. В. МОРОЗОВ

(Ленинград)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МОДУЛЯЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИИ

При решении целого ряда задач, например для передачи трехмерных изображений по каналам связи в реальном масштабе времени, возникает необходимость создания голограмм заданной информационной емкости.

Можно получить голограмму заданной информационной емкости, оперируя оптической голограммой, например, путем создания составной голограммы, передачи объектов с малыми угловыми размерами и т. д.

Другой эффективный путь получения голограммы заданной информационной емкости — увеличение длины волны электромагнитного излучения, которое используется при регистрации голограммы. Длина волны выбирается исходя из возможностей получателя информации.

Если получатель информации — человек, то для согласования объема передаваемой информации с возможностями его зрения целесообразно увеличить длину волны электромагнитного излучения, используемого при регистрации голограммы, до величины [1]

$$\lambda = \delta D/k, \quad (1)$$

где δ — угловая разрешающая способность человеческого глаза; D — размер голограммы; k — коэффициент, близкий к 1 для заданной задачи. Длины волн, которые определяются условием (1), лежат в радиодиапазоне. Изображение, восстановленное по радиоголограмме, будет иметь характерные искажения, вызванные различием коэффициентов поглощения, отражения и пропускания в оптическом и радиодиапазонах, а также увеличением длины волны.

Для того чтобы в какой-то мере уменьшить эти искажения, применяется метод модуляционной голографии [2].

Для регистрации модуляционной голограммы используется источник света, модулированный СВЧ-колебаниями, а в качестве регистрирующего устройства — приемник, выделяющий эту модуляцию.

Представим интенсивность света, дифрагировавшего на объекте и регистрируемого в некоторой плоскости, в виде

$$B(x, y, t) = B_0(x, y) + B_m(x, y) \cos[\Omega t + \Phi_0(x, y)]. \quad (2)$$

Здесь $B_0(x, y)$ — распределение интенсивности света, зависящее от отражающих свойств объекта в оптическом диапазоне; $B_m(x, y)$ — амплитуда модуляции интенсивности света, рассеянного объектом; $\Phi_0(x, y)$ — фаза этой модуляции.