

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ, РЕАЛИЗОВАННАЯ НА ОСНОВЕ БИНАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В данной работе обсуждается голографическая ассоциативная память (ГАП), использующая оптическую запись информации в виде голограмм. Элементы изображения двоичных объектов входных и хранимых образов организованы как черно-белые транспаранты и записываются в ГАП, которая использует систему с безлинзовым диффузором. Представлены экспериментальные результаты распознавания различных входных данных и даны аналитические выражения для ГАП, приводятся результаты моделирования на компьютере.

1. Введение

Нейронные сети человеческого мозга, как известно, устроены как ассоциативная память и связаны параллельно. Оптическая обработка информации с использованием голограмм, имеет такие же свойства. Впервые создать голографическую ассоциативную память (ГАП) попытался Ван Хеердан [1] в 1963 г. Д.Габор [2] теоретизировал ГАП, позволяющую не только восстанавливать хранимое изображение по фрагменту (автоассоциация), но также восстанавливать другой объект, ассоциирующийся с выходным объектом (гетероассоциация). Эксперимент с ГАП использующей плоскую голограмму был выполнен М.Сакагучи [3]. Была предложена и продемонстрирована полностью оптическая ГАП с обратной связью, использующая Фурье-преобразование голограммы и фазовые сопряженные зеркала [4]. Объем памяти ГАП был оценен для различных оптических преобразований, таких как Френель, Фурье и рассеянных преобразований. Наряду с теоретическим моделированием нейронных сетей Дж. Хопфилд [5] разработал детально модель нелинейной ассоциативной памяти внешнего хранения. Н. Фархат [6] провел эксперимент с оптической реализацией данной модели, где оптическая система основывалась на оптическом процессе векторно-матричного произведения. В этой модели, хранятся M двоичных векторов длиной N бит. Затем, m -й вектор из синаптической матрицы (межсоединений) T автоассоциативной памяти определяется выражениями

$$b^m = (b_1^m, b_2^m, \dots, b_N^m), \quad m=1, 2, \dots, m_0, \dots, M \quad (1)$$

$$T_{ij} = \sum_{m=1}^M (2b_i^m - 1)(2b_j^m - 1), \quad T_{ij}=0, \quad ij=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Когда T перемножается с одним из хранимых векторов то, отношение сигнал-шум, определяемое отношением предполагаемого значения выходных данных к стандартному отклонению, определяется следующим образом:

$$C/Ш = [N_0 / (M-1)]^{1/2}, \quad (3)$$

где N_0 – число единиц в b^{m_0} .

Исследована ГАП, использующая оптическое кодирование голограмм с безлинзовым диффузором. ГАП хранит автоассоциации бинарных объектов на отдельной голограмме. Бинарные объекты кодируются двумя взаимно перпендикулярными состояниями линейной поляризации, а затем закодированные объекты записываются при помощи системы с безлинзовым диффузором. Ассоциативные свойства ГАП анализируются в оптическом эксперименте и в моделировании на компьютере для разных расстояний Хэмминга, определяемых числом различных пикселей между хранимым объектом и входным объектом. Для разъяснения свойств ГАП, рассмотрим 1-D двоичные объекты и получим аналитически некоторые выражения для ГАП. Расширение для 2-D объясняется в последующем разделе, таким образом, два 2-D двоичных объекта в виде букв

используется в эксперименте. Результаты оптического эксперимента и компьютерного моделирования представлены и они сравниваются с результатами алгоритма Хопфилда.

2. Процесс реализации ГАП

Рассмотрим ГАП, в которой хранится M одномерных объектов \mathbf{b}^m , $m=1,2,\dots,m_0,\dots,M$, соответственно с прозрачными и темными пикселями. Когда один из объектов \mathbf{b}^{m_0} сохраняется, объект кодируется двумя взаимно перпендикулярными состояниями линейной поляризации и представляется в виде двоичного вектора, количество битов которого равно 5 как показано на рис. 1(а).

На рис. 1(б) схематически показаны процесс реализации с безлинзовым диффузором. Поляризационно закодированный объект в плоскости I_1 проектируется коллиминационно на регистрирующую среду и там интерферирует с рассеянными лучами от такого же объекта в плоскости I_2 . Затем зарегистрированная голограмма может быть разделена на зоны подголограмм, количество которых будет равно $N=5$ – количеству пикселей в спроектированном объекте. Как следствие кодирования прозрачных (непрозрачных) пикселей двумя состояниями поляризации, интерференция имеет место на голографической среде только тогда, когда коллимирующие лучи и рассеянные лучи имеют точно такие же состояния поляризации. Каждый из пяти коллимирующих лучей интерферирует со всеми рассеянными лучами с подобными состояниями поляризации, что дает результат в зоне подголограммы. Мы представляем конструктивное или деструктивное состояние интерференции между коллимирующим лучом и рассеянным лучом двоичными числами 1 и 0 соответственно, а интерференционные картины на всех зонах подголограмм определяются $P_{i1}^{m_0}, P_{i2}^{m_0}, \dots, P_{i5}^{m_0}$, где $i=1,2,\dots,5$, как показано на рис. 1(б).

Все элементы $P_{ij}^{m_0}$, $i=1,2,\dots,5$ для отдельного значения j определяют интерференционные картины на j -ой подголограмме и аналитически они представляются

$$P_{ij}^{m_0} = 1/2 \left[(2b_i^{m_0} - 1)(2b_j^{m_0} - 1) + 1 \right], \quad i=1,2,\dots,5 \quad (4)$$

где $1/2$ – коэффициент нормализации. В этом выражении $b_i^{m_0}$ и $b_j^{m_0}$ двоичные числа, представляющие состояние поляризации

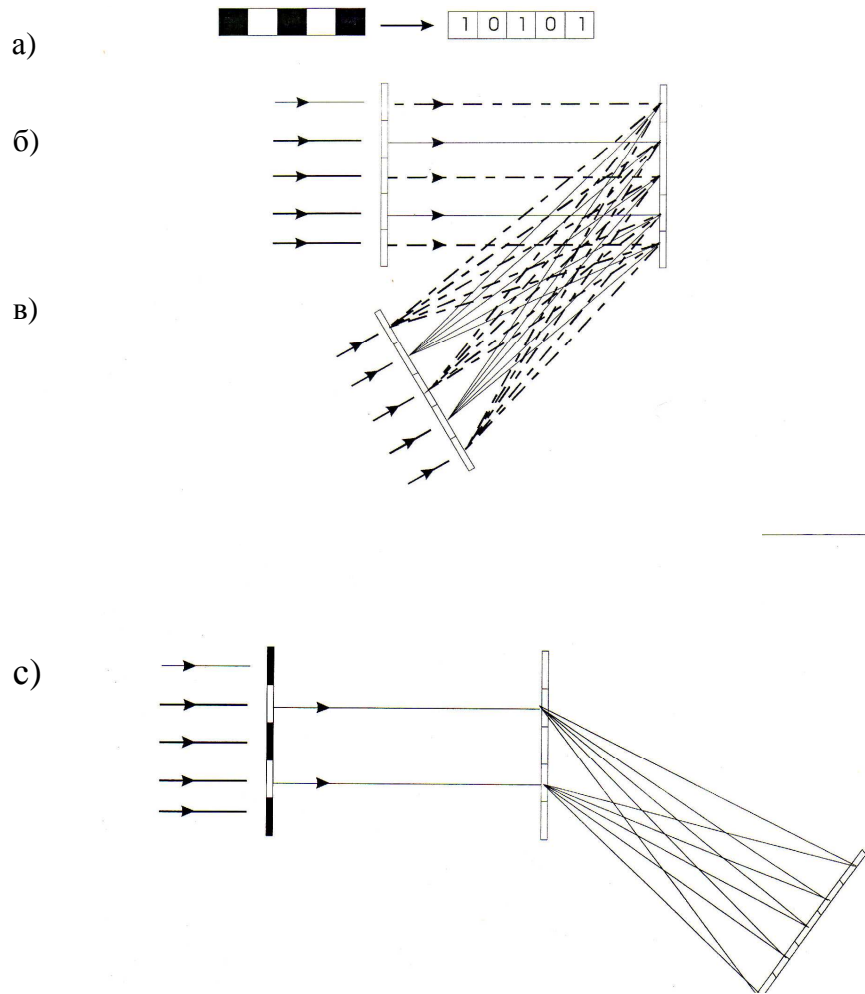


Рис. 1. Оптическая схема реализации процесса ГАП.

рассеянного луча, проходящего через j -й пиксель в I_1 плоскости, соответственно. Обычно для сохранения M объектов, каждый, из которых состоит из 5 пикселей, голографическая регистрирующая среда экспонируется M , последовательно записывая интерференционные картины между M парами кодированных объектов, размещенных в I_1 и I_2 плоскостях. Интерференционные картины, наложенные на голограмму, могут быть описаны как сумма векторных произведений матриц P :

$$P_{ij} = \sum_{m=1}^M P_{ij}^m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{2} \right) \left[(2b_i^m - 1)(2b_j^m - 1) + 1 \right] \quad i, j=1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

На рис. 1(с) приведена схема восстановления входного объекта по одному из хранимых объектов, где все лучи кроме сходящихся рассеянных лучей 1-го порядка игнорируются. На этом рисунке, в качестве входного объекта используется транспарант. Прозрачные и непрозрачные пиксели во входном объекте представляются двоичными 1 и 0, соответственно, так что входной объект может быть представлен как вектор из $N=5$ элементов. Заметим, что процесс кодирования поляризации используется только в случае, когда голограмма регистрируется так, как показано рис. 1(в), например, когда один из хранимых объектов \mathbf{b}^{m_0} используется как входной данные (HDIST=0) на рис. 1(с) показано, как получают $N=5$ пикселей. Рассеянные лучи от голограмм строят пиксели выходного объекта. Интенсивность пикселей выходного объекта могут быть получены как результат векторно-матричного умножения:

$$\delta_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} b_j^{m_0} = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{1}{2} \left[(2b_i^m - 1)(2b_j^m - 1) + 1 \right] b_j^{m_0} =$$

$$\frac{1}{2} (2b_i^{m_0} - 1) \sum_{j=1}^N (2b_j^{m_0} - 1) b_j^{m_0} + \frac{1}{2} \sum_{m \neq m_0}^M (2b_i^m - 1) \sum_{j=1}^N (2b_j^m - 1) b_j^{m_0} + \frac{1}{2} M N_0, \quad (6)$$

где $i=1,2,\dots,N$, а N_0 – число единиц (или количество прозрачных пикселей) во входном объекте. Эти выходные данные состоят из требуемого сигнала в первом выражении, перекрестные шумы во втором и сигнала, зависящего от выходных данных, в последнем. Предположим, что эти перекрестные корреляции хранимых объектов незначительны, а каждый пиксель в любом хранимых объектов имеет случайное значение 1 и 0 с почти равной вероятностью, тогда величина первого выражения всегда будет больше, чем величина второго шумового выражения. Поэтому, выходные данные пороговой операции на уровне $U=(1/2)M/N_0$, последнее выражение (6), пороговые выходные данные $\text{TH}[b_i]$ становятся такими же, как хранимые объекты $b_i^{m_0}$, где $\text{TH}[b_i]=1$ когда $b_i > V$ и $u=0$ в других случаях. Требуемое значение $E[b_i]$ и расхождение выходных данных σ_i^2 в выражении (6) будут выглядеть следующим образом:

$$E[b_i] = \frac{N_0}{2} (2b_i^{m_0} - 1) + \frac{1}{2} M N_0 \quad (7)$$

$$\sigma_i^2 = E[(b_i - E[b_i])^2] = E \left[\sum_{m \neq m_0}^M \sum_{m' \neq m_0}^M \frac{1}{4} (2b_i^m - 1)(2b_i^{m'} - 1) \sum_{j=1}^N \sum_{j'=1}^N \frac{1}{4} (2b_j^m - 1)(2b_j^{m'} - 1) b_j^{m_0} b_{j'}^{m_0} \right] =$$

$$= E \left[\sum_{m \neq m_0}^M \frac{1}{4} (2b_i^m - 1)^2 \sum_{j=1}^N (2b_j^m - 1)^2 (b_j^{m_0})^2 \right] = \frac{1}{4} (M - 1) N_0 \quad (8)$$

Исключая пороговый уровень $U = (1/2) M N_0$, требуемое значение выражения (7) становится $\pm N_0/2$, а расхождение не зависит от позиции пикселя i . Поэтому отношение сигнал-шум вычисляется следующим образом:

$$C/\Pi = [1/2 N_0 (2b_i^{m_0} - 1)] / [1/4 (M - 1) N_0]^{1/2} = [N_0 / (M - 1)]^{1/2}, \quad (9)$$

что соответствует как в модели Хопфилда в выражении (3). Аналитическое матричное представление выражения (5) для ГАП аналогично модели Хопфилда, модифицированной путем добавления байесовского и порогового уровня, зависящего от входных данных. Матрица P не имеет отрицательных значений. Поэтому, мы можем верить, что предлагаемая ГАП является удовлетворительным подходом к голографической реализации векторно-матричного произведения ассоциативной памяти. Из выражения (9) отношение сигнал – шум можно предполагать, что ГАП имеет память и способность исправлять ошибки с такой же модели Хопфилда.

3. Экспериментальные результаты

Одномерную ГАП можно расширить до 2-D, об этом мы подробно описали в предыдущем разделе. Для эксперимента возьмем два двоичных объекта (буквы) из 2-D кыргызского алфавита $b^1(i)$ и $b^2(\epsilon)$ состоящих из 25 пикселей, как показаны на рис. 2(a) слева. Объект кодируется двумя взаимно перпендикулярными состояниями линейной поляризации, как показано на рис. 2(a) слева. На рис. 2(c) они представляются в векторной форме, где пиксели упорядочены по схеме рис. 2(b). В этом примере $M=2$, а $N=25$.

На рис. 3(a) показана схема системы с безлинзовым диффузором для записи 2-D объектов, где изображен поляризованный кодированный объект из b^1 . Среда регистрации голограмм экспозируется последовательно два раза, используя один и тот же диффузор, первый раз регистрируя с поляризованными кодами первого вектора b^1 , второй раз соответственно со вторым поляризованным кодом вектора b^2 .

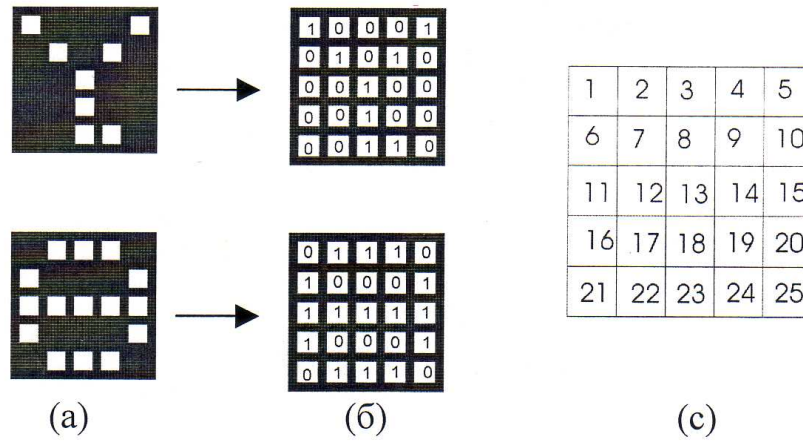
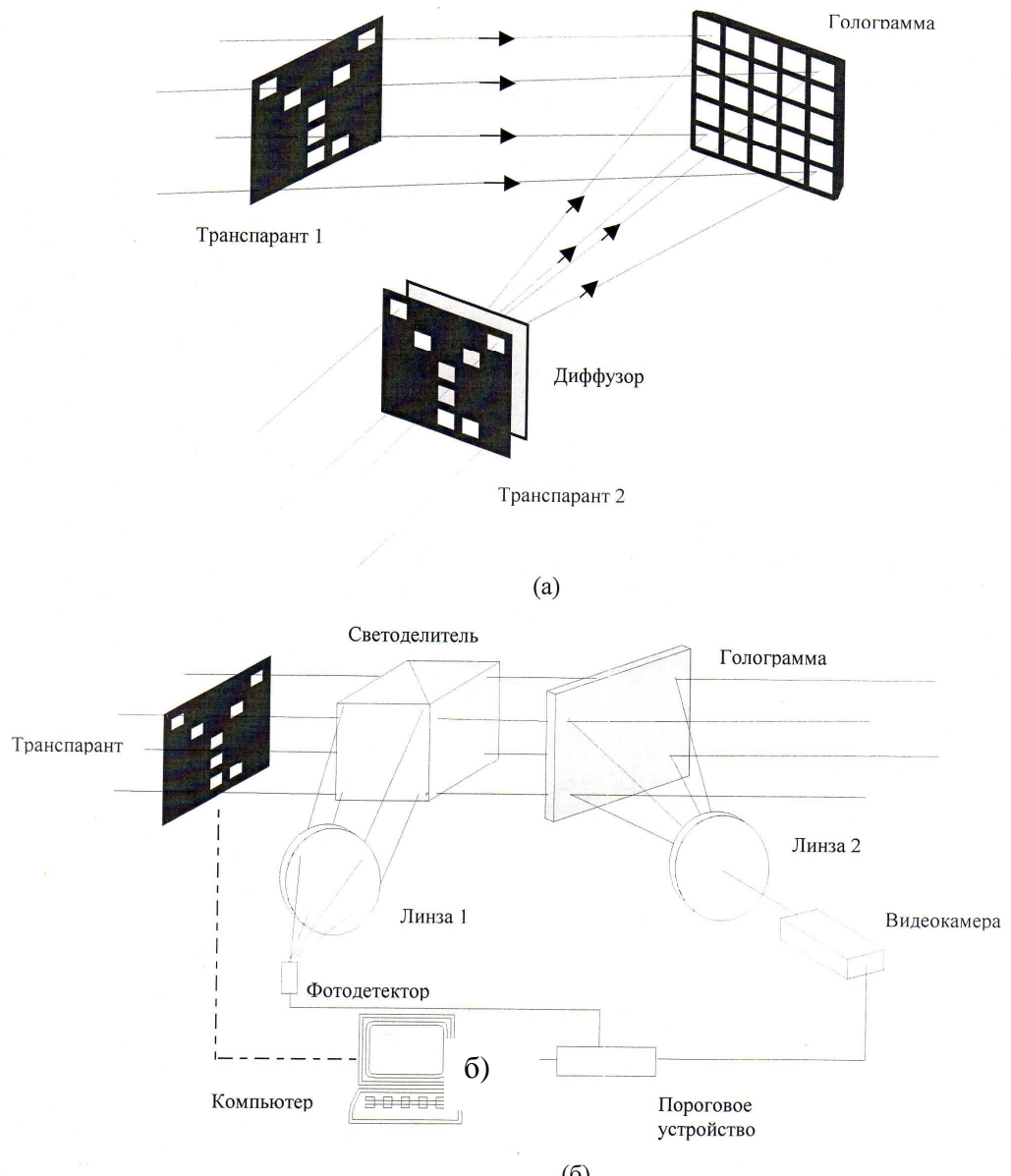


Рис.2

В эксперименте использован оптический диффузор, оптическая стеклянная подложка из порошка силикона карбида и реоксан для регистрирующей среды. На рис. 3(б) показана оптическая система для распознавания незнакомого входного объекта. Входной объект кодирован в виде непрозрачного транспаранта. Система распознавания состоит из голограмм, хранящих два кыргызских алфавита b^1 и b^2 , видеокамеры (D_1) для обнаружения распознанных выходов на экране, детектора фотодиода (D_2) для определения уровня входной зависимости порогового устройства $U=(1/2MN_0)$ в уравнении (6) и электронного процессора для выполнения пороговой операции выхода на уровне U . Степень пороговой операции определяется обнаружением интенсивности света исходящего от расщепителя лучей на детекторе фотодиода, так как она прямо пропорциональна количеству входных пикселей прозрачности (N_0). Сравнивая обнаруженный сигнал видеокамеры с этим фотодиодом, значения пороговой функции показаны в мониторе компьютера. Обратная связь, обозначенная штриховой линией на рис. 3(б) для итераций, выполнен используя маску, сделанную в эксперименте такой же пороговой функцией.

Получение свойства ГАП, искаженные версии хранимых образов с некоторым расстоянием Хэмминга, используемой как входной образ в



системе

Рис. 3(а) оптическая схема устройства с безлинзовым диффузором, (б) оптическая система для распознавания образов.

Расстояние Хэмминга входного объекта линейно усилен от 0 до 25 посредством последовательного обращения контрастов пикселя от 25 пикселей в каждом хранимом объекте. В случае, когда входы имеют расстояние Хэмминга 0, 2, 5, 25, получены экспериментальные результаты на мониторе восстановленного выходного объекта в нормальном режиме и посредством применения порога. Когда расстояние Хэмминга равно 5, то как и в случае 2 или 0, искаженные входные образы восстановлены из памяти после порогового уровня достаточно ясно. При большом расстоянии Хэмминга, то есть при 20 и 25 полностью восстанавливать в памяти соответствующий хранимый образ становится труднее. Все пиксельные контрасты искаженного входного образа заменены с их реверсивными пикселями, то есть затемненные пиксели становятся прозрачными, а прозрачные – затемненными относительно хранимого образа в памяти.

Компьютерное моделирование представленных моделей ГАП осуществлен на основе выражения (6) с использованием порогового уровня U . Получены экспериментальные результаты оптического и компьютерного моделирования ГАП. В эксперименте искаженные входные образы с расстоянием Хэмминга равным до 7 и

распознавание хранимого образа в памяти осуществляются за один проход. В случае, когда расстояние Хэмминга колеблется в пределах от 8 до 14, последовательность распознавания образов происходит спонтанно и некачественно и не дает требуемого эффекта. Результаты оптического эксперимента почти согласуются с компьютерным моделированием модели Хопфилда.

4. Заключение

Исследованы и экспериментально продемонстрированы работы голографической ассоциативной памяти хранимых двух образов в виде двух букв алфавита, каждые из которых содержат 5x5 бинарных пикселей. Пиксели образов были закодированы двумя взаимно перпендикулярными состояниями линейной поляризации. Процесс кодирования поляризации осуществлялся в реальном масштабе времени с использованием 2-мерных пространственных световых модуляторов, в жидко-кристаллическом виде телемонитором или магнитооптическим устройством.

Конструктивным решением оптической голографической памяти, представленной здесь, было использование системы линзовых диффузоров, однако, размеры пикселей образов ограничены эффектом дифракции. Предельные ограничения отношений представлены в виде

$$4\lambda < 1 \ll d^2/\lambda, \quad (10)$$

где λ – длина волны источника света, 1 – расстояние между входной плоскостью I_1 и плоскостью голограмм, как показано на рис. 3(а) и d – размер пикселей. Для нашего эксперимента взяты, соответственно $1=80$ мм и $\lambda=0,62$ мкм, так что размер пикселя должен быть не менее 2,5 мм.

Голограммы образов с 25 пикселями, использованные в эксперименте, были записаны на регистрирующие среды методом наложения и разделены на 25 подголограмм (рис. 3(а)). Каждая подголограмма имела $N=25$ интерференционных картин, так что количество интерференционных картин $N^2=(25 \times 25)$ соответствовало размерам, где-то (3x3) см регистрирующей среды, который дает гораздо меньше, чем плотность элемента разрешения, элемента относительно регистрирующей среды. Однако, количество N может быть увеличено в большом числе в пределах ограничения наложения плотности разрешения элемента относительно регистрирующей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. P.J.van Heerden, Theory of Optical Information Storage in Solids, Appl. Opt. 2, 393, 1963.
2. D.Gabor, Associative Holographic Memories, IBM J. Res. Dev. 13, 156, 1963.
3. M.Sakaguchi, N.Nishida and T.Nemoto, A New Associative Memory System Utilizing Holography, IEEE Trans. Comput. C-19, 1174, 1970.
4. B.H.Soffer, G.J.Dunning, Y. Owechko and E.Marom, Associative Holographic Memory with Feedback Using Phase-Conjugate Mirrors, Opt. Lett. 11, 118, 1986.
5. J.J. Hopfield, Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 79, 2554, 1982.
6. N.H. Farhat, D. Plastis, A. Prata and E. Paek, Optical Implementation of the Hopfield Model. Appl. Opt. 24, 1469. 1985.