УДК 535.4+159.9

К МОДЕЛИРОВАНИЮ АССОЦИАТИВНЫХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ ТЕХНИКОЙ ОБЪЁМНЫХ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ

В. В. Орлов*, А. В. Павлов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены два явления, характерные для объёмных наложенных голограмм: формирование вследствие нелинейности среды структур диэлектрической проницаемости, соответствующих интерференции опорных волн, не интерферировавших в реальности, и двукратная дифракция волн в объёме голограмм. Показано, что при восстановлении голограмм данные механизмы формируют ассоциативную связь между волнами, не связанными между собой явным образом в силу разновремённой записи отдельных голограмм. Силы данных связей пропорциональны скалярному произведению сигнальных образов. Применительно к записи объёмных наложенных голограмм по схеме голографии Фурье с плоскими внеосевыми опорными пучками дана нейросетевая модель, учитывающая описанные механизмы.

введение

В 1906 году немецкий психолог А. Гольдшайдер выдвинул гипотезу о волновой природе механизмов памяти человека [1]. В конце 60-х годов XX века нейрофизиолог К. Х. Прибрам развил эти идеи и сформулировал подход к описанию процессов в мозге на основе голографических методов [1, 2]. Этот подход опирается на ряд аналогий между свойствами памяти и свойствами голограмм, среди которых в первую очередь следует упомянуть ассоциативность, дистрибутивность, т. е. распределённость информации по объёму носителя (памяти), обучаемость на примерах вместо программирования и параллельность представления информации в виде картин распределения нейронной активности, а также ряд других.

При этом К. Прибрам чётко ограничил рамки правомочности приведённых аналогий, указав, что речь идёт только о математике голографии и функции мозга, а не об оптических голограммах или компьютерной реализации голографии [1].

Наиболее разработанное на практике направление в рамках голографического подхода — голографическая ассоциативная память. Этому направлению посвящены сотни статей, упомянем только основные [3–8]. В этих работах свойство ассоциативности реализовано в смысле восстановления эталонного образа при предъявлении его фрагментированной, искажённой или дефектной версии. В пионерских работах [6, 7] голографическая ассоциативная память рассматривалась как реализация модели нейронной сети Хопфилда. Нейронная сеть Хопфилда представляет собой динамическую систему с аттрактором, определяемым скалярным произведением векторов, которые описывают эталонное и объектное (предъявляемое) изображения [9]. Эта модель определяет автоассоциативную память как единственный тип решения, достижимый в данной нейронной сети.

Вместе с тем, в живых системах свойство ассоциативности имеет большое значение, поскольку интеллектуальные способности субъекта определяются не столько способностью запоминания, сколько способностью к самостоятельному установлению ассоциаций между информационными единицами (образами и понятиями), не связанными между собой явным образом при обучении.

^{*} orlov4v8v@yandex.ru

В статьях [10–12] показана возможность реализации в схеме голографии Фурье более сложных видов ассоциаций, описываемых моделями нечётко-значимой логики, линейного предсказания и правдоподобных рассуждений. В этих работах использована модель тонкой голограммы. В то же время существенный интерес представляют объёмные голограммы, многие свойства которых соответствуют основным атрибутам биологической памяти [13, 14]. За счёт использования спектральной и угловой селективности объёмные голограммы позволяют значительно увеличить ёмкость памяти при низком уровне перекрёстных помех.

В данной статье показана возможность моделирования более сложных, чем автоассоциативная память, ассоциативных свойств, включая самостоятельное установление связей между вербальными понятиями. При моделировании будут использованы свойства объёмных наложенных голограмм, записанных методом углового мультиплексирования, в том числе при нелинейной записи голограмм. Для соотнесения этих механизмов с подходами и методами, развиваемыми в когнитивных исследованиях, дана нейросетевая модель объёмных наложенных голограмм на основе нейронной сети «звезда Гроссберга».

1. МОДЕЛЬ ОБЪЁМНОЙ НАЛОЖЕННОЙ ГОЛОГРАММЫ

Рассмотрим запись объёмных наложенных голограмм (см. рис. 1) методом углового мультиплексирования, т. е. с последовательной записью парциальных голограмм при разных направлениях распространения плоских опорных волн. Покажем два процесса, актуальных в контексте задачи формирования ассоциаций, не заданных явным образом при записи. Примем, что сигнальные волны O при записи всех парциальных голограмм имеют одинаковое направление распространения, а опорные R — разное. Для голограмм плоских волн разделение на сигнальные и опорные условно, оно будет важно при переходе к рассмотрению обработки изображений в схеме голографии Фурье с плоским внеосевым опорным пучком. Условимся, что объёмные наложенные голограммы освещаются волной, идентичной *i*-й опорной волне R_i и, соответственно, будем её обозначать также R_i .

1.1. Влияние квадратичной нелинейности регистрирующей среды

В статье [15] показано, что при записи объёмных наложенных голограмм в среде с квадратичной зависимостью приращения диэлектрической проницаемости от экспозиции возникают структуры диэлектрической проницаемости (решётки), которые описываются выражением

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = 2\chi_2\varepsilon_1 t^2 Q \sum_{\substack{l=1\\l\neq i}}^M \sum_{i=1}^M G_{il} \exp[j\left(\varphi_i - \varphi_l\right)] \exp[j\left(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_l\right)\mathbf{r}].$$
 (1)

Здесь j — мнимая единица, ε_1 — диэлектрическая проницаемость регистрирующей среды до её экспонирования, $\chi_2 = \chi'_2 + j\chi''_2$ — комплексный коэффициент пропорциональности квадратичной зависимости приращения диэлектрической проницаемости от экспозиции, t — время записи одной парциальной голограммы, одинаковое для всех голограмм, Q — интенсивность опорных волн, также одинаковая для всех голограмм, M — число наложенных голограмм, G_{il} — скалярное произведение векторов комплексных амплитуд *i*-й и *l*-й сигнальных волн, k_i и k_l — волновые векторы опорных волн, φ_i и φ_l — их фазы, \mathbf{r} — радиус-вектор в объёме голограмм. Допущение о равенстве параметров t и Q для всех парциальных голограмм принято для упрощения выражений без потери общности при анализе рассматриваемых механизмов.

Решётки (1) соответствуют решёткам, которые сформировались бы при интерференции *i*-й и l-й опорных волн — интерференции, которой в реальности не было в силу разновремённости записи *i*-й и l-й голограмм. Соответственно, посредством этих решёток формируется связь *i*-й и l-й опорных волн, сила которой пропорциональна произведению G_{il} . Напомним, что скалярное произведение удовлетворяет аксиоматическому определению метрики, т.е. служит мерой близости (сходства), в данном случае — сходства *i*-й и l-й сигнальных волн.

1.2. Многократная дифракция в объёме голограммы

Второй механизм возникновения ассоциативной связи основан на многократной дифракции волн в объёме наложенных голограмм. При освещении объёмных наложенных голограмм опорной волной R_i *i*-я голограмма в результате первого акта дифракции восстанавливает соответствующую сигнальную волну O_i . Волна O_i , распространяясь в объёме голограмм, дифрагирует на других парциальных голограммах и, если она не ортогональна сигнальным волнам этих голограмм, в следующем акте дифракции восстанавливает опорные волны других голограмм $\sum_{n=1}^{M} R_n$. Таким образом, получается последовательность

$$R_i \to O_i \to \sum_{n=1}^M R_n,$$

где символ «→» означает один акт дифракции на парциальной голограмме. Процесс не останавливается на двух актах дифракции, но с учётом низкой дифракционной эффективности парциальной голограммы, ограничимся только их рассмотрением.

Для нахождения амплитуд восстановленных опорных волн при освещении объёмных наложенных голограмм волной R_i используем результаты, представленные в статьях [16, 17]. Если $\mathbf{R}_i(0)$ — вектор освещающей голограмму опорной волны на первой поверхности голограммы, то, согласно выражениям (23) из [16] и (11) из [17], вектор, описывающий поле, восстановленное в объёме на расстоянии z от первой поверхности, может быть представлен в виде

$$\mathbf{V}_{ri} = \exp(jD\mathbf{H}z)\mathbf{R}_i(0) = \mathbf{R}_{ri}(z) + \mathbf{O}_{ri}(z),$$

где $D = k_0 t \sqrt{\varepsilon_1}/2$, **H** — матрица наложенных голограмм, описывающая решётки диэлектрической проницаемости объёмных наложенных голограмм, k_0 — волновое число излучения в вакууме, векторы $\mathbf{R}_{ri}(z)$ и $\mathbf{O}_{ri}(z)$ описывают комплексные амплитуды восстанавливаемых в объёме голограммы волновых полей, соотносимых с опорной и сигнальной волнами, соответственно.

Нас интересует вектор комплексных амплитуд $\mathbf{R}_{ri}(z)$, который может быть представлен в виде совокупности восстановленных в результате дифракции Брэгга на наборе решёток опорных волн [17]:

$$\mathbf{R}_{ri}(z) = \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{M} S_{mi}^* \cos(\mathcal{H}z\sqrt{\tau_m}) S_{mn} \mathbf{R}_n(0) + \sum_{m=K+1}^{M} \sum_{n=1}^{M} S_{mi}^* S_{mn} \mathbf{R}_n(0),$$
(2)

где K — число компонент сигнальных волн, \mathcal{H} — параметр, зависящий от условий записи голограмм, S_{mn} — компоненты собственных ортонормированных векторов матрицы Грама сигнальных волн, а $\mathbf{R}_n(0)$ – вектор комплексных амплитуд *n*-й опорной волны на первой поверхности наложенных голограмм. Напомним, что элементами матрицы Грама являются скалярные произведения векторов комплексных амплитуд сигнальных волн G_{mn} (подробное рассмотрение дано в Приложении 1 статьи [16]). Положим в выражении (2)

$$\cos x \approx 1 - x^2/2,$$

В. В. Орлов, А. В. Павлов

что соответствует учёту первых двух актов дифракции волн в объёме голограмм. Если число компонент сигнальных волн K превышает число наложенных голограмм M, то второе слагаемое в правой части выражения (2) становится равным нулю. При этих допущениях, учитывая соотношение (ПЗ) из [17], получим

$$\mathbf{R}_{ri}(z) = \mathbf{R}_i(0) - \frac{1}{2} \mathcal{H}^2 z^2 Q \sum_{n=1}^M G_{ni} \mathbf{R}_n(0).$$
(3)

Из выражения (3) следует, что при освещении объёмных наложенных голограмм i-й опорной волной восстанавливаются опорные волны других наложенных голограмм, амплитуды которых пропорциональны скалярному произведению амплитуд сигнальных волн этих голограмм и i-й голограммы G_{ni} .

1.3. Эффективность механизмов

Таким образом, у объёмных наложенных голограмм существуют два механизма формирования ассоциации между опорными волнами, существовавшими в разное время, т. е., явным образом не связанными между собой при записи голограммы. Первый обусловлен квадратичной нелинейностью регистрирующей среды, второй — двукратной дифракцией волн в объёме голограммы. Сравним силы этих ассоциаций, приняв в качестве оценки дифракционную эффективность, которую определим как отношение интенсивностей восстановленной и освещающей голограммы опорных волн.

Для решётки диэлектрической проницаемости, возникающей в результате квадратичной нелинейности, из (1) получим следующее значение дифракционной эффективности:

$$\eta_{2N}(z) = \frac{k^2 \varepsilon_1 \chi_2^2 t^4 Q^2 |G_{il}|^2 z^2}{\cos^2 \theta} \,. \tag{4}$$

Для волны, возникающей в результате двух актов дифракции, из (3) следует, что итоговая дифракционная эффективность (т. е. эффективность обеих парциальных голограмм, участвующих в формировании *i*-й и *l*-й волн (3)) описывается следующим выражением:

$$\eta_{\rm 2D}(z) = \frac{1}{64\cos^4\theta} \, k^4 \varepsilon_1^2 \chi_1^4 t^4 Q^2 \, |G_{il}|^2 z^4.$$
(5)

Здесь θ — средние углы падения опорных и сигнальных волн (схема записи голограмм симметричная, т. е. средние углы падения опорных и сигнальных волн на регистрирующую среду одинаковы), k — волновое число, χ_1 — коэффициент пропорциональности между линейным приращением диэлектрической проницаемости регистрирующей среды и экспозицией при записи голограмм.

Из выражений (4) и (5) видно, что в обоих случаях дифракционная эффективность как оценка силы ассоциативной связи пропорциональна квадрату модуля скалярного произведения амплитуд сигнальных волн G_{il} . С увеличением толщины наложенных голограмм (регистрирующей среды) сила ассоциации, обусловленной двукратной дифракцией волн, увеличивается пропорционально четвёртой степени толщины z, а сила ассоциации, обусловленной нелинейностью — пропорционально второй степени.

При формировании за счёт описанных механизмов ассоциативного отклика R_l *i*-я парциальная голограмма, освещаемая своей опорной волной R_i , одновременно восстанавливает и свою сигнальную волну O_i , играющую применительно к отклику R_l роль помехи. Поэтому сравним дифракционную эффективность ассоциативных откликов (4) и (5) с эффективностью $\eta_i(z)$, с которой *i*-я парциальная голограмма восстанавливает сигнальную волну. Воспользуемся выраже-

нием (24) из работы [17] и выразим дифракционную эффективность (4) и (5) через эффективность $\eta_i(z)$ *i*-й парциальной голограммы:

$$\eta_{2N}(z) = 4 \left(\frac{\chi_2}{\chi_1}\right)^2 t^2 Q \, \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}} \, \eta_i(z),\tag{6}$$

$$\eta_{2\mathrm{D}}(z) = \frac{1}{4} \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}^2} \eta_i^2(z).$$
(7)

При записи большого числа наложенных голограмм дифракционная эффективность каждой парциальной голограммы мала. Согласно [18], в качестве грубой оценки можно принять $\eta_i(z) < 10^{-4}$.

Поскольку в (7) входит скалярное произведение амплитуд сигнальных волн G_{il} , то интенсивность отклика, обусловленного двукратной дифракцией волн, не менее, чем в 10⁴ раз меньше интенсивности сигнальной волны. В выражении (6) $\chi_2/\chi_1 \ll 1$, т.е. интенсивность волны, восстановленной в результате нелинейности регистрирующей среды, также много меньше интенсивности сигнальной волны. Отсюда естественным образом возникает вопрос о практической значимости описанных механизмов в плане возможности регистрации ассоциативного отклика R_l . Для ответа конкретизируем анализ применительно к схеме голографии Фурье с плоским внеосевым опорным пучком (рис. 1) и соотнесём её с известными моделями искусственный нейронных сетей.

2. МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ СО СВЯЗЯМИ ПО СХЕМЕ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Сигнальные O_n и опорные R_n волны предполагаются плоскими. Переход от плоских волн к обработке изображений (картин) I(x, y) основан на преобразовании Фурье

$$F[I(x,y)] = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} I(x,y) \exp\left[-j 2\pi \left(\nu_x x + \nu_y y\right)\right] \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}y,$$

реализуемом тонкой фокусирующей линзой. При моделировании работы мозга такой переход оправдан в силу того, что мозг, являясь нейронной сетью, обрабатывает картины распределения нейронных потенциалов [19]. 4f-схема голографии Фурье с плоским опорным пучком (рис. 1) может быть представлена в виде модели нейронной сети «звезда Гроссберга» (рис. 2) при определении нейрона как элемента разрешения, ограниченного дифракционным пределом; далее будем обозначать этот элемент как i(x, y) [20]. Изображения как совокупность элементов i(x, y) будем обозначать I(x, y). Точечный источник будем обозначать $\delta(x, y)$.

Нейронная сеть «звезда Гроссберга» (см. рис. 2) обучается предъявлением M пар ассоциируемых векторов $I_n(x, y) \leftrightarrow \delta_n(x, y), n \in [1, M]$, один из которых — изображение $I_n(x, y)$ в слое In, а второй — дельта-функция δ_n , описывающая единственный нейрон в слое Out, сопоставляемый этому изображению. На этапе обучения (записи голограммы) функция δ_n как точечный опорный источник предъявляется в слое In. При записи голограммы для каждой пары все изображения $I_n(x, y)$ располагаются в одном положении в плоскости In, а точечный опорный источник каждый раз в другом месте плоскости In. Сила связей каждого нейрона $i_n(x, y)$, где n — номер изображения, в слое изображений In с нейроном δ_n в слое Out определяется видностью картины интерференции соответствующих плоских волн, формируемых положительной линзой L_1 .

Данная структура связей «звезда Гроссберга» представляет интерес в контексте формирования связей между сенсорными образами и вербальными понятиями. Изображения $I_n(x, y)$ пред-



Рис. 1. 4f-схема голографии Фурье с плоскими внеосевыми опорными пучками: In — входная плоскость, Out — выходная плоскость, I_i — сигнальный образ, δ_i и δ_l — точечные опорные источники при записи *i*-й и *l*-й голограмм во входной плоскости In и их восстановленные изображения в выходной плоскости Out, L_1 и L_2 — фурье-преобразующие линзы с фокусным расстоянием f, H — объёмная голограмма. Сплошные линии соответствуют пучкам при записи и восстановлении *i*-й голограммы, штриховые линии — пучкам при записи и восстановлении *l*-й голограммы



Рис. 2. Представление 4f-схемы голографии Фурье с плоскими внеосевыми опорными пучками моделью нейронной сети «звезда Гроссберга». Слои нейронной сети соответствуют плоскостям In и Out рис. 1, матрица связей нейронных слоёв реализуется каскадом двойного преобразования Фурье с линзами L_1, L_2 и голограммой H. Сплошные линии соответствуют связям $I_i(x, y) \leftrightarrow \delta_i$, заданным при обучении, штриховые линии — связям $I_i(x, y) \leftrightarrow \delta_l$, самостоятельно формируемым сетью в результате действия описанных механизмов

ставляют собой образы как картины распределения сенсорных стимулов, в том числе запомненных, а соответствующие им нейроны δ_n представляют собой вербальные понятия. Такой подход соответствует концепции Гроссберга, согласно которой формирование понятия представляет собой процесс автолокализации — стягивания образа к единственному нейрону. Подход, в рам-

ках его реализации схемой голографии Фурье, соответствует также и классификации «образ понятие» [21], согласно которой образ представлен в пространстве признаков (в нашем случае в пространстве Фурье [22]) унимодальным распределением — спектром изображения, а понятие плато, т. е. характеризуется постоянной спектральной плотностью $|F(\delta)| = \text{const.}$

В результате обучения для каждой пары формируется своя структура связей, изображённая на рис. 2. Связи *i*-й картины с *l*-м нейроном в слое Out при обучении не задаются. В рамках классического подхода, как нейросетевого, так и оптического, не учитывающего описанные выше механизмы, эти связи в силу свойства угловой селективности объёмных голограмм не возникают и при освещении голограммы восстанавливающей волной R_i . Но показанные в предыдущем разделе голографические механизмы в рамках нейросетевой модели обеспечивают самостоятельное формирование сетью не заданных при обучении связей между понятиями. Конкретно, решётками, возникающими за счёт нелинейности среды, формируется непосредственная связь понятий, а также связь образ—понятие $I_i(x, y) \leftrightarrow \delta_l$. Тем самым формируются связи понятие—образ понятие $\delta_i \leftrightarrow I_i(x, y) \leftrightarrow \delta_l$ за счёт двух актов дифракции.

Оценкой силы этих связей применительно к реализации объёмных наложенных голограмм по схеме голографии Фурье (см. рис. 1) может служить отношение интенсивностей изображения I_i , восстановленного в плоскости Out опорным источником δ_i , к интенсивности восстановленного изображения δ_l . Для оценки воспользуемся результатами работы [23], в которой показано, что при описании обрабатываемых изображений как реализаций однородных случайных полей отношение сигнал/помеха в выходной плоскости схемы рис. 1 определяется выражением

$$V = \frac{L_x L_y}{2k r_{\zeta} r_{\eta}} = \frac{\Omega_x \Omega_y}{2k_{\rm a}} \,. \tag{8}$$

Здесь L_x и L_y — половины длин сторон изображения, r_{ζ} и r_{η} — радиусы корреляции, $\Omega_x = L_x/r_{\zeta}$ и $\Omega_y = L_y/r_{\eta}$ — обобщённые пространственные частоты, k_a — коэффициент, определяемый формой автокорреляционной функции и принимающий в большинстве практически значимых случаев значения, несущественно отличающиеся от 2.

В рамках нашего рассмотрения сигналом служит восстановленное в задней фокальной плоскости второй фурье-преобразующей линзы изображение *l*-го точечного опорного источника, а помехой — восстановление *i*-го образа. Тогда в первом приближении можно получить требования на эффективность описанных механизмов, определяемую возможностью одновременной регистрации восстановленных образов I_i и δ_l :

$$\Delta \frac{\Omega_x \Omega_y}{2k_{\rm a}} \eta_{\rm 2N}(z) = 2\Delta \frac{\Omega_x \Omega_y}{k_{\rm a}} \left(\frac{\chi_2}{\chi_1}\right)^2 t^2 Q \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}} \eta_i(z) \approx 1,\tag{9}$$

$$\Delta \frac{\Omega_x \Omega_y}{2k_{\rm a}} \eta_{\rm 2D}(z) = \Delta \frac{\Omega_x \Omega_y}{8k_{\rm a}} \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}^2} \eta_i^2(z) \approx 1.$$
(10)

Здесь Δ — динамический диапазон сенсора в плоскости Out. Отсюда получаем, что эффективность описанных механизмов определяется обобщённой пространственной частотой *i*-го изображения $\Omega = \Omega_x \Omega_y$, которая является мерой его информативности, учитывающей внутреннюю коррелированность изображений как атрибут информации, отличающий его от шума [24]. В первом приближении условия заметности описанных эффектов, т.е. возможности одновременной регистрации восстановленных изображений *i*-го образа и *l*-го опорного источника можно сформулировать следующим образом:

$$\Omega_x \Omega_y \ge \left[\frac{2\Delta}{k} \left(\frac{\chi_2}{\chi_1} \right)^2 t^2 Q \, \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}} \, \eta_i(z) \right]^{-1},\tag{11}$$

В. В. Орлов, А. В. Павлов

$$\Omega_x \Omega_y \ge \left[\frac{\Delta}{8k} \frac{|G_{il}|^2}{G_{ii}^2} \eta_i^2(z)\right]^{-1}.$$
(12)

Здесь выражение (11) относится к нелинейности, выражение (12) — к дифракции.

Таким образом, возможность самостоятельного установления связей *i*-го и *l*-го опорных источников, т. е. *i*-го и *l*-го вербальных понятий, определяется как аппаратными характеристиками (свойствами сенсора, регистрирующих сред и условиями записи голограмм), так и информационными характеристиками образов I_i и I_l , ассоциированных с этими вербальными понятиями (информационной ёмкостью, оцениваемой величиной Ω , так и информационной близостью, оцениваемой скалярным произведением G_{il}). В случае некоррелированных образов произведение $G_{il} = 0$ и, вне зависимости от свойств регистрирующих сред и динамического диапазона сенсора, эффект будет отсутствовать. Условие частичной коррелированности образов $G_{il} > 0$ является обязательным, по мере роста G_{il} требования к информационной ёмкости Ω , как видно из (11) и (12), снижаются.

Иными словами, описанные механизмы формирования ассоциаций будут работать только в рамках ограниченной субъективной предметной области. Подчеркнём условие субъективности — коррелированность *i*-го и *l*-го образов применительно к обработке мозгом картин распределения нейронных потенциалов определяется не только (и не столько) объективной близостью отображаемой информации, сколько их ситуационной близостью. Ситуационная близость, в свою очередь, определяется в значительной мере мотивацией, состоянием памяти и потребностями субъекта, воспринимающего информацию [25, 26]. Вопрос субъективизации объективной информации на этапе восприятия выходит за рамки нашего рассмотрения.

Возможность одновременной регистрации изображений *i*-го и *l*-го опорных источников определяется дифракционной эффективностью объёмных наложенных голограмм в части пропускания волны нулевого порядка дифракции, т. е. в первую очередь свойствами регистрирующей среды.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При последовательной записи в объёмных регистрирующих средах наложенных голограмм методом углового мультиплексирования имеют место два механизма, позволяющих реализовать эффект, отчасти аналогичный самостоятельному установлению нейронной сетью связей между образами и «чужими» понятиями, а также между двумя вербальными понятиями, не связанными явным образом при обучении. Эффективность этих связей определяется как свойствами регистрирующей среды, т. е. материального носителя интеллекта, так и свойствами сенсорных образов, в первую очередь их ситуационной и информационной близостью, мерой которой служит скалярное произведение комплексных амплитуд соответствующих сигнальных волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12–01–00418-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Прибрам К. // Синергетика и психология. Вып. 1. Методологические вопросы. М.: МГСУ «Союз», 1997.
- 2. Pribram K.H. // Scientific American. 1969. V. 220. P. 73.
- 3. Gabor D. // IBM J. Research and Development. 1969. V. 13, No. 2. P. 156.
- 4. Микаэлян А. Л. // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14, № 1. С. 115.

- 5. Твердохлеб П. Е. // Сб. трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк основоположник отечественной голографии». СПб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2007. С. 65.
- 6. Paek E.G., Psaltis D. // Optic. Engineering. 1987. V. 26, No. 5. P. 428.
- 7. Owechko Y., Dunning G.J., Marom E., Soffer B.H. // Appl. Opt. 1987 V. 26. P. 1900.
- 8. Кузнецов О. П. // Опт. журн. 2003. Т. 70, № 8. С. 25.
- 9. Yu F. T. S., Suganda J. Optical signal processing, computing, and neural networks. New York: Wiley, 1992.
- 10. Павлов А.В. // Изв. РАН. Сер. «Теория и системы управления». 2003. № 2. С. 118.
- 11. Павлов А.В. // Новости искусственного интеллекта. 2006. № 2. С. 41.
- 12. Павлов А.В. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 1. С. 3.
- 13. Орлов В. В. // Опт. журн. 2006. Т. 73, № 9. С. 83.
- 14. Орлов В. В. // Опт. журн. 2011. Т. 78, № 9. С. 50.
- 15. Орлов В. В. // Письма в Журн. техн. физ. 2004. Т. 30, № 24. С. 77.
- 16. Орлов В. В. // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92, № 4. С. 676.
- 17. Орлов В. В. // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92, № 5. С. 862.
- 18. McMichael I., Christian W., Pletcher D., et al. // Appl. Opt. 1996. V. 35, No. 14. P. 2375.
- Борисюк Г. Н., Борисюк Р. М., Казанович Я. Б., Иваницкий Г. Р. // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172, № 10. С. 1189.
- 20. Павлов А.В. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76, № 5. С. 794.
- 21. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 4. С. 121.
- 22. Павлов А.В. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 1. С. 3.
- 23. Шубников Е.И. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62, № 2. С. 450.
- 24. Корогодин В.И. Информация и феномен жизни. Пущино: АН СССР, 1991. 202 с.
- 25. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. М.: URSS, 1980. 200 с.
- 26. Судаков К. В. // Изв. РАН. Сер. «Биологическая». 2012. № 1. С. 61.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

ON MODELING OF THE BIOLOGICAL MEMORY ASSOCIATIVE PROPERTIES BY THE VOLUME SUPERIMPOSED HOLOGRAMS TECHNIQUE

V. V. Orlov, and A. V. Pavlov

We consider two phenomena that are typical of the volume superimposed holograms, namely, the formation of the dielectric-permittivity structures corresponding to interference of the reference waves, which did not interfer in reality, due to the nonlinearity of the medium, and double diffraction of the waves in the hologram volume. It is shown that when the holograms are recovered, these mechanisms form associatiations between the waves which are not linked explicitly by virtue of the different-time record of individual holograms. The forces of the associative links are proportional to the scalar product of the signal images. A neural network model that allows for the described mechanisms as related to recording of the volume superimposed holograms using the Fourier holography scheme with plane off-axis reference beams is proposed.