

## МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ КОРРЕЛИРОВАННОСТИ ПРИ ПОРОЖДЕНИИ ПОНЯТИЙ НА НЕЙРОСЕТИ СО СВЯЗЯМИ ПО СХЕМЕ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

© 2013 г. В. Н. Васильев, доктор техн. наук; К. А. Исаков, студент;  
Л. С. Лялюшкин, студент; А. В. Павлов, канд. техн. наук

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

E-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru

В развитие подхода к реализации в схеме голографии Фурье индуктивного обобщения как метода порождения абстрактных понятий на основе обработки сенсорных образов рассмотрено взаимодействие двух конкурирующих механизмов, участвующих в формировании понятия – нелинейного итерированного отображения в плоскости корреляций, ведущего к разрушению внутренней коррелированности понятия, и дифракции на перезаписываемой голограмме, восстанавливающей внутреннюю коррелированность. Показано, что характеристика индексного (опорного) образа, представляющего реальность, и характеристика голограммы, определяемая свойствами регистрирующей среды и методом ее записи, оказывают преобладающее, относительно характеристик итерированного отображения, влияние на формирование внутренней коррелированности порождаемого понятия.

*Ключевые слова:* голография, информация, внутренняя коррелированность, когнитивные системы, искусственный интеллект, образное мышление, понятие, индуктивное обобщение, нейронные сети.

Коды OCIS: 090.6186, 070.6110, 100.2960, 070.4790

Поступила в редакцию 01.02.2013

### Введение

В когнитивных науках традиционно выделяют две формы мышления – образное и понятийное [1]. Понятийное мышление трактуется как развитие мышления образного посредством формирования абстрактных понятий и связей между ними при обработке сенсорных образов. В работе [2] сенсорный образ и абстрактное понятие рассмотрены как крайние случаи внутренних представлений информации – образ в абстрактном пространстве признаков характеризуется унимодальным распределением с хорошо локализованным максимумом, а понятие – плато или пологим холмом, охватывающим широкий диапазон значений частных признаков.

Основываясь на функциональной асимметрии полушарий головного мозга (ГМ) [3], в когнитивных науках эти две формы мышления исследуются по преимуществу в рамках раз-

ных парадигм – понятийное в компьютерной, а образное – нейросетевой [4]. Такое разделение слабо соответствует реальности, поскольку в биологических системах эти две формы неразрывны: и сенсорная, и понятийная информации физически реальны как картины нейронной активности коры ГМ – паттерны внутренней репрезентации информации (ПВР), которые обрабатываются биологической нейронной сетью (НС) – мозгом [5]. Как подчеркивается в работе [6], абсолютизация одной формы мышления при игнорировании другой (т. е. функций только одного полушария ГМ) – “антиподы совершенной науки”. Соответственно необходима интеграция этих форм, включая поиск нейросетевых механизмов развития образного мышления в понятийное. В этом плане актуальны голографические информационные технологии, традиционно связываемые с обработкой образов [7].

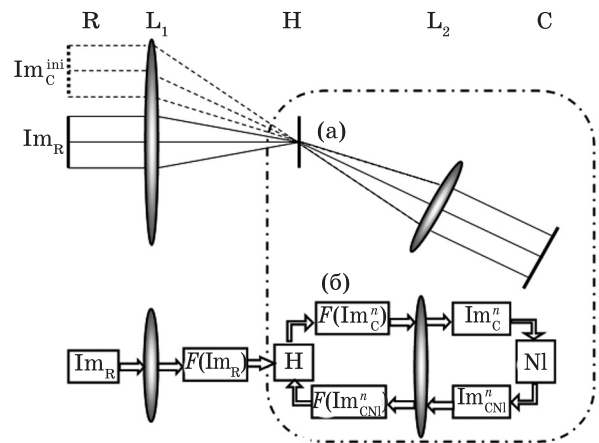
Один из методов формирования понятий – индуктивное обобщение [8] как специфическая

форма обучения, обеспечивающая преобразование базы данных в базу знаний [9]. В статье [10] предложен подход к реализации индуктивного обобщения на НС со связями слоев по схеме голографии Фурье, согласующийся с классификацией образ – понятие [2]. Этот метод соответствует когнитивному подходу к обработке информации, основанному на выдвижении гипотезы как исходного не достоверного, но лишь правдоподобного суждения о наблюдаемом факте, и ее последующей верификации. В работе [11] показано, что физические механизмы формирования и запоминания межнейронных связей методом голографии Фурье, буквально соответствующие биологически мотивированному правилу обучения Хебба, обуславливают условием достижения максимальной общности индуктивного понятия его согласование с индексным образом в смысле равенства модулей их спектров. Индексный образ в терминах голографии есть опорный образ. Требование согласованности означает, что максимальная общность достигается при формировании у понятия внутренней коррелированности (ВК), равной ВК индексного образа.

Этот вывод, полученный из рассмотрения частных, сугубо физических, механизмов – интерференции и записи на регистрирующих средах (РС), соответствует общему пониманию ВК как фундаментального атрибута информации [12] и процесса порождения информации как становления “дальних” связей [13–15]. Однако конкретный механизм самостоятельного формирования сетью ВК в работе [11] рассмотрен не был – вопрос остался открытым.

Ответ на это вопрос был предложен в работах [16, 17], где показано, что требуемый механизм самостоятельного согласования спектров, ведущего к формированию ВК, дает дифракция на голограмме, физически выполняющая заключительный и важнейший этап когнитивного процесса порождения понятий – соотнесение гипотезы с реальностью и ее корректировку по результатам этого соотнесения. Дифракция играет роль диссипативного фактора, а индексный образ дает приток энергии, необходимой для порождения информации как становления диссипативных структур в открытой неравновесной системе [13–15].

В данной статье, в развитие работ [10, 11, 16, 17], рассмотрено взаимодействие двух механизмов, участвующих в порождении понятия – итерирующего нелинейного отображения в плоскости корреляций, ведущего к разрушению ВК, и дифракции на голограмме, восстанавливающей ВК понятия.



**Рис.1.** Двухслойная НС со связями по схеме голографии Фурье (а). Представление двухслойной НС, показанной на рис. 1а, в виде открытой кольцевой автоколебательной системы (б). R – слой репрезентации индексного образа  $Im_R$ , C – слой репрезентации индуцируемого образа, H – матрица связей – голограмма Фурье,  $L_1, L_2$  – фурье-преобразующие линзы. Исходный индуцируемый образ  $Im_C^{ini}$  при обучении сети показан на рис. 1а штриховой линией.

## 1. Подход: модель нейронной сети и индуктивного вывода

Чтобы не отсылать читателя к ранее опубликованным работам [10, 11, 13, 14], для связности изложения вкратце напомним основные моменты развиваемого подхода. Схема голографии Фурье (рис. 1а) рассматривается как двухслойная НС – плоскость изображений обозначена в терминах НС как слой репрезентаций индексного образа R, а плоскость корреляций как слой репрезентаций индуцируемого понятия C (*concept*). Запись голограммы – обучение НС посредством предъявления двух ПВР – индексного  $Im_R(x, y)$  в слое R и индуцируемого в понятие исходного  $Im_C^{ini}(x, y)$  в слое C. Оба ПВР на этапе записи голограммы представлены во входной плоскости схемы. Голограмма Фурье реализует матрицу связей слоев

$$H_{RC}(v_x, v_y) = \eta \{ F^* [Im_R(x, y)] F [Im_C^{ini}(x, y)] \}, \quad (1)$$

где  $v_x, v_y$  – пространственные частоты,  $\eta$  – оператор, описывающий дополнительную фильтрацию как следствие нелинейности голографических регистрирующих сред (ГРС), астериск обозначает комплексное сопряжение.

При восстановлении голограммы индексным образом  $\text{Im}_R$  в слое С формируется паттерн

$$\text{Im}_C(\zeta, \eta) = [\text{Im}_R(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y) * \text{Im}_C^{\text{ini}}(x, y)]_{\eta}, \quad (1)$$

где  $\otimes$  и  $*$  – символы операций корреляции и свертки соответственно, нижний индекс  $\eta$  обозначает дополнительную фильтрацию на голограмме (1).

Подход к реализации индукции основан на введении шкалы общности признаков образа. Роль такой шкалы играет реальная шкала частот  $\nu_x, \nu_y$ , при этом общие признаки имеют низкочастотные компоненты, частные – только высокочастотные. Задача индукции в работе [10] трансформирована в техническую задачу расширения спектра индуцируемого ПВР  $F[\text{Im}_C(\zeta, \eta)]$ , содержащего только высокочастотные компоненты, в область низких частот. Эта задача решается в ходе итерационной процедуры нелинейного обращения волнового фронта в слое С с переобучением НС – перезаписью голограммы (1) на каждой итерации и ее последующим восстановлением индексным образом.

Нелинейное итерирующее отображение (ИО)  $\mathbb{N}$  в слое С в статье [11] вводилось из условия расширения диапазона признаков индуцируемого ПВР как расширения спектра согласно классификации “образ–понятие” [2]

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \{ |F[\text{Im}_C^n(\zeta, \eta)]| \} = \text{Const}, \quad (3)$$

что, в свою очередь, определяет направленность процесса в слое С

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [\text{im}_C^n(\zeta, \eta)] = \delta, \quad (4)$$

где  $\text{im}_C^n$  – элемент разрешения индуцируемого ПВР  $\text{Im}_{\text{CNI}}^n(\zeta, \eta)$  на  $n$ -й итерации, нижний индекс  $\mathbb{N}$  обозначает паттерн после отображения в слое С, получаемого методами обращения волнового фронта, а  $\delta$  – пиксел как дифракционный предел разрешения в схеме. Отметим, что условие (4) следует из условия (3), предъявляемого только к спектру амплитуд, и потому определяет только элементы паттернов, но не сами ПВР в целом.

Условие (4) описывает “хаотизацию” паттерна гипотезы посредством разрушения его внутренней коррелированности.

На каждой итерации после обращения волнового фронта  $\text{Im}_{\text{CNI}}^n(\zeta, \eta)$  в слое С в обратном

ходе лучей  $\text{C} \rightarrow \text{H}$  записывается новая ( $n$ -я) голограмма, ассоциирующая текущий ( $n$ -й) индуцируемый ПВР с индексным

$$H_{\text{RC}}^n(\nu_x, \nu_y) = \eta \{ F^n[\text{Im}_R(x, y)] F[\text{Im}_{\text{CNI}}^n(\zeta, \eta)] \}. \quad (5)$$

Затем голограмма (5) восстанавливается индексным ПВР  $\text{Im}_R(x, y)$  и в слое С формируется новый вариант индуцируемого паттерна

$$\text{Im}_C^{n+1}(\zeta, \eta) = [\text{Im}_R(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y) * \text{Im}_{\text{CNI}}^n(\zeta, \eta)]_{\eta}. \quad (6)$$

Поскольку нас интересует трансформация образа  $\text{Im}_C(\zeta, \eta)$ , то в выражении (6) член  $[\text{Im}_R(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y)]_{\eta}$  представляет импульсный отклик системы, символ  $n$  в нижнем индексе означает, что импульсный отклик может меняться на каждом шаге в соответствии с изменяющимися условиями записи  $n$ -й голограммы. В результате отображение (6) на голограмме (5) ведет к зависящему от метода ее записи изменению размеров элементов ПВР (6) относительно их размера после ИО в слое С

$$(\text{im}_C^{n+1})_{\alpha} \neq (\text{im}_{\text{CNI}}^n)_{\alpha},$$

где  $\alpha$  – уровень измерения ширины элемента разрешения ( $\alpha$ -срез).

## 2. Динамика системы

### 2.1. Предварительное замечание

В рамках изложенного подхода НС (рис. 1а) может быть представлена в виде открытой кольцевой системы (рис. 1б). Поскольку индексный и индуцируемый образы в общем случае имеют сложный спектральный состав [10], а функция автокорреляции (ФАК) индексного образа  $[\text{Im}_R(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y)]_{\eta}$  имеет глобальный максимум (ГМ ФАК), то ПВР (6) после ряда итераций будет иметь ярко выраженный глобальный максимум (ГМП). Это отчасти согласуется со взглядом Гроссберга на порождение понятия как на процесс автолокализации ПВР [18] – для достаточно репрезентативных ПВР значение отношения амплитуд ГМП к боковым максимумам [19] будет превосходить динамический диапазон фазосопрягающего зеркала, реализующего ИО в слое С, и реально из всего ПВР (6) обращаться будет лишь ГМП. Но по Гроссбергу автолокализация есть стягивание ПВР в один нейрон, т. е. превращение ПВР в  $\delta$ -функцию,

лишенную по определению ВК. В данном же случае выражение (6) учитывает ВК порождаемого паттерна, т. е. автолокализация должна происходить как стягивание ПВР не к одному, но к некоторой области нейронов, активированных ГМП.

Исходя из этих соображений, далее в качестве  $\text{im}_a$  будем оценивать диаметр ГМП по заданному уровню  $-d_c$ , рассматривая его как интересующую нас с учетом искомого решения (4) характеристику возможного аттрактора динамической системы. Диаметр ГМ ФАК индексного образа по тому же уровню, что и  $d_c$ , обозначим  $d_R$ .

## 2.2. Итерирующее отображение

Условие конвергентности динамики НС к решению (4) в предположении консервативности системы очевидно задается видом ИО – в рабочем участке динамического диапазона, нормированного для удобства в интервал  $[0, 1]$ , ИО  $\text{NI}(\text{im})$  должно иметь две неподвижные точки 0 и 1. Напомним, что неподвижная точка  $x_f$  определяется условием  $\text{NI}(x_f) = x_f$  [20]. Сама функция  $\text{NI}$  для схождения к устойчивому решению (4) должна быть выпуклой книзу

$$\forall \text{im}_c \in (0, 1) \mid \text{NI}'(\text{im}_c) > 0. \quad (7)$$

Однако вследствие условия (7) неподвижная точка 1 будет отталкивающей – на каждой итерации расстояние до нее любой, сколь угодно близкой на начальных итерациях, точки будет увеличиваться [20]. Как результат, в силу неизбежных на практике погрешностей и шумов хотя бы на одной итерации и, следовательно, на всех последующих, будет иметь место  $\text{Max}[\text{Im}_c(\zeta, \eta)] \neq 1$  и процесс в реальности будет сходиться к единственной притягивающей неподвижной точке

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [\text{Im}_c^n(\zeta, \eta)] = 0. \quad (8)$$

Поэтому практически необходима не определенная для идеальных условий выпуклая книзу, а традиционная для НС сигмоидальная функция ( $S$ -функция), имеющая две притягивающие точки на границах диапазона  $[0, 1]$  и третью неподвижную отталкивающую точку  $r$  (*repeller*) между ними. В диапазоне  $[0, r']$ ,  $r' \leq r$  функция должна быть выпуклой книзу.

Положение неподвижной точки  $r$  задает устойчивое решение, к которому стремится система в предположении консервативности

– если  $r > a$ , где  $a$  – уровень измерения  $d_c$  и  $d_R$ , то система будет сходиться к условию (4) как аттрактору системы, описываемой функцией Ляпунова, заданной скалярным произведением векторов  $\text{Im}_R(x, y)$  и  $\text{Im}_C(\zeta, \eta)$  [21],

– если  $r = a$ , то система будет сходиться к

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (d_c) = d_R, \quad (9)$$

– если  $r < a$ , то система будет сходиться к

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (d_c) > d_R > \delta, \quad (10)$$

где  $\delta$  – дифракционный предел разрешения в схеме (размер пиксела).

Однако допущение о консервативности правомочно только в пренебрежении дифракцией на перезаписываемой голограмме (5).

## 2.3. Дифракция на голограмме

Рассмотрим влияние дифракции на голограмме (5) как диссипативного фактора на динамику системы. Чтобы не загромождать изложение, примем, что уже достигнуто состояние  $d_c = \delta$ . Тогда в пространстве Фурье

$$\{F[\text{Im}_{\text{CNI}}^n(x, y)]\}^2 = \text{Conts}(v_x, v_y).$$

Пусть РС для записи  $H_{R \leftrightarrow C}^n$  – линейна. Тогда в диапазоне частот выше частоты равенства амплитуд опорного и сигнального пучков при записи голограмма [21] будет согласована с индексным ПВР

$$H_{R \leftrightarrow C}^{n+1}(v_x, v_y) \propto F^*[\text{Im}_R(x, y)].$$

При восстановлении голограммы индексным образом в слое С формируется паттерн

$$\begin{aligned} \text{Im}_C^{n+1}(\zeta, \eta) &= (F\{F[\text{Im}_R(x, y)]H_{R \leftrightarrow C}^{n+1}(v_x, v_y)\}) = \\ &= [\text{Im}_R(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Следующая итерация после отображения в слое С снова дает

$$[\text{NI}(\text{Im}_C^{n+1})]_a = \delta \quad (12)$$

и процедура повторяется. В результате, имеем подобие циклического аттрактора, в котором минимальное значение “цикла” (12) определяется итерирующим отображением  $Nl$ , а максимальное (11) стремится к значению ширины ГМ ФАК  $[Im_R(x, y) \otimes Im_R(x, y)]_{\eta}$  по заданному уровню  $\alpha$  и определяется амплитудным спектром индексного ПВР.

С учетом значительного перепада амплитуд в спектрах Фурье реальных изображений должна быть принята модель нелинейной РС для записи голограммы [22]. Тогда максимальное значение этого “цикла” (11) определяется с учетом фильтрации, обусловленной нелинейностью РС и условиями записи голограммы (5), описываемыми оператором  $\eta$ . В этом смысле можно утверждать, что индексный образ субъективен, так как отображение происходит не на исходном  $Im_R(x, y)$ , представленном в слое  $R$ , а на записанном на голограмме (5), т. е. подвергнутом дополнительной фильтрации оператором  $\eta$ . Субъективность понимается здесь, согласно работе [1], как зависимость абстрактной модели обработки информации от индивидуального опыта и характеристик материального носителя интеллекта. В данном случае свойства РС и условия записи голограммы, определяющие характеристики записанного на голограмме индексного образа, соответствуют в рамках парадигмы НС индивидуальным свойствам сигналов и индивидуальным же условиям обучения – индивидуальному жизненному опыту соответственно.

Термин “циклический” правомочен, по мнению авторов статьи, весьма условно, только в контексте формирования понятия, поскольку максимальные и минимальные значения “цикла” представляют состояния системы на разных этапах процесса и, соответственно, в разных точках схемы рис. 1. В терминах теории динамических систем динамика конвергентна.

#### 2.4. Численное исследование динамики сети

Моделировалось порождение в НС рис. 1 индуктивного понятия при представлении паттернов  $Im_R(x, y)$  и  $Im_C^{ini}(x, y)$  как реализаций случайных процессов с экспоненциальным спектром амплитуд и случайным спектром фаз с нормальным распределением. В слое  $C$  моделировался ряд ИО, нормированных в диапазон  $[0, 1]$

- $Nl(Im_C) = A[B + D \exp(-E Im_C)]^{-1}$ ,
- $Nl(Im_C) = (A Im_C - B)(D + |A Im_C - B|)^{-1}$ ,
- $Nl(Im_C) = Im_C^8$ ,
- $Nl(Im_C) = \cosh^m(Im_C)$ ,
- $Nl(Im_C) = \tanh^m(Im_C)$ ,

где  $A, B, D, E$  – параметры, а показатель степени  $m$  варьировался в некоторых пределах.

Использованы три модели РС – линейная (5) и две модели дополнительных фильтров, адекватных реальным голограммам Фурье: моделирующий высокочастотную голограмму сигмоидальный (S-фильтр)

$$\eta(v_x) = [1 + \exp(S_1 - S_2 v_x)]^{-1} \quad (13)$$

и моделирующий “среднечастотную” голограмму полосовой фильтр, являющийся суммой двух функций Гаусса

$$\eta(v_x) = \exp\left[\frac{-(v_x - G_1)^2}{G_3}\right] + \exp\left[\frac{-(v_x + G_2)^2}{G_3}\right], \quad (14)$$

где  $S_1, S_2, G_1, G_2, G_3$  – параметры.

В качестве характеристик системы в устойчивом режиме вычислялись диаметр ГМ ФАК индексного образа по уровню  $0,5$

$$d_R = \{[Im_R(x, y) \otimes Im_R(x, y)]_{\eta}\}_{0,5},$$

и характеристики порождаемых ПВР понятия ГМП – максимальное значение “цикла” (10) ( $d_C^{10}$ ) и минимальное значение “цикла” (12) ( $d_{CNI}^{10}$ ).

Частотный диапазон исходного индуцируемого образа  $\Delta_v$  задавался в нормированных на размер паттерна  $Im_C^{ini}(x, y)$  единицах частоты  $v_{n0} = v_0 2L$ , где  $v_0$  – нижняя частота диапазона,  $2L$  – размер ПВР (в пикселах).

В табл. 1 приведены указанные характеристики для ИО –  $Nl(Im_C) = Im_C^8$  и трех описанных моделей матрицы связей.

В таблице обращает на себя внимание последняя строка (нелинейная РС (13)). Даже если исходная матрица связей (1) записана так, что разрушена ВК запомненного на голограмме (1) индексного образа ( $d_R = 2$ ), то НС в ходе итерационной процедуры перезаписи голограммы (5) формирует ВК порождаемого понятия посредством обращения к реальности, представленной исходным индексным образом в слое  $R$  ( $d_R = 7,5$ ). При этом величина  $d_C^{10}$ , определяемая сверткой (6), зависит от дополнитель-

ной фильтрации (13) или (14), определяемой свойствами РС для записи голограммы – в этом смысле осуществляется принцип субъективности мышления. Вместе с тем величина  $d_C^{10}$  практически не зависит (в пределах погрешности) от частотного диапазона исходного индуцируемого паттерна  $\Delta_v$ : в этом смысле формируемое понятие объективно, т. е. не зависит от индивидуальных особенностей восприятия – частотных характеристик сенсоров, сенсорных трактов и РС.

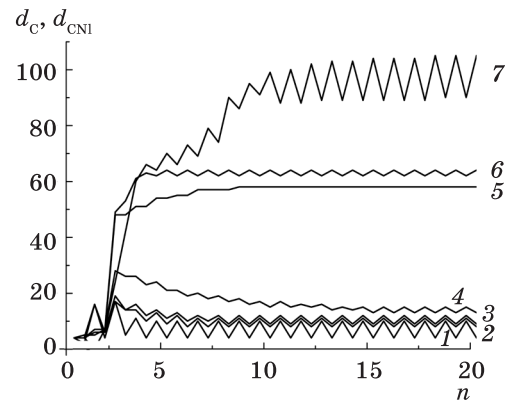
**Таблица 1.** Характеристики устойчивых режимов для итерирующего отображения  $Nl(\text{Im}_c) = \text{Im}_c^8$  и трех моделей голограммы

Модель голограммы	$d_R$ , пикс.	$\Delta v, v_{n0} = 10$	$d_C^{10}$ , пикс.	$d_{\text{CNI}}^{10}$ , пикс.
линейная РС (1)	7,5	$[v_{n0}, 1,2v_{n0}]$	8,3	2,8
		$[2v_{n0}, 4v_{n0}]$	8,3	2,8
нелинейная РС (13)	5,2	$[v_{n0}, 1,2v_{n0}]$	10	3,2
		$[2v_{n0}, 4v_{n0}]$	9,3	3,2
нелинейная РС (14)	2	$[v_{n0}, 1,2v_{n0}]$	8,2	2,7
		$[2v_{n0}, 4v_{n0}]$	8,2	2,7

**Таблица 2.** Характеристики устойчивых режимов в зависимости от положения отталкивающей неподвижной точки для двух моделей итерирующего отображения

$r$	$Nl(\text{Im}_c) = A[B + \text{Dexp}(-E\text{Im}_c)]^{-1}$		$Nl(\text{Im}_c) = (A\text{Im}_c - B) \times (D A\text{Im}_c - B )^{-1}$	
	$\Delta$	$\Delta_{\text{NM}}$	$\Delta$	$\Delta_{\text{NM}}$
0,065	14	0,13462	–	–
0,171	–	–	8	0,0924
0,337	2	0,03175	–	–
0,379	–	–	3	0,05265
0,5	0	0	0	0
0,6209	–	–	2	0,09405
0,663	2	0,14286	–	–
0,7538	–	–	4	0,2659
0,837	3	0,28571	–	–
0,8289	–	–	4	0,40055
0,935	3	0,31579	–	–
1	–	–	5	0,937
1	6	0,85714	–	–

Далее моделировалось влияние на характеристики ПВР порождаемого понятия положения отталкивающей неподвижной



**Рис. 2.** Динамика системы. Зависимости ширины ГМП порождаемого понятия после отображения на голограмме  $d_C^{10}$  (верхние значения циклического режима) и после нелинейного итерирующего отображения в слое С  $d_{\text{CNI}}^{10}$  (нижние значения циклического режима) от номера итерации  $n$  при линейной модели РС для значений неподвижной точки  $r$ : 1 – 1, 2 – 0,935, 3 – 0,837, 4 – 0,663, 5 – 0,5, 6 – 0,337, 7 – 0,065.

точки  $r$  S-образного ИО. На рис. 2 приведена динамика системы – зависимости  $d_C^{10}$  и  $d_{\text{CNI}}^{10}$  от номера итерации для ряда значений неподвижной точки  $r$  при линейной модели РС. Динамика соответствует предсказанной в разделе 2.2.: при  $r < 0,5$  имеем  $d_C^{10} > d_{\text{CNI}}^{10}$ , при  $r = 0,5$  “цикл” отсутствует  $d_C^{10} = d_{\text{CNI}}^{10}$ , а при  $r > 0,5$  имеем инверсию “цикла”  $d_C^{10} < d_{\text{CNI}}^{10}$ . В табл. 2 приведены характеризующие устоявшиеся режимы в зависимости от положения неподвижной точки  $r$  оценки “циклов”, в качестве которых приняты величины: абсолютная

$$\Delta = |d_C^{10} - d_{\text{CNI}}^{10}| \text{CNI}$$

и относительная

$$\Delta_{\text{NM}} = \frac{2|d_C^{10} - d_{\text{CNI}}^{10}|}{d_C^{10} + d_{\text{CNI}}^{10}}$$

Для оценки влияния степени нелинейности ИО вкупе с положением неподвижной точки  $r$  в качестве оценки нелинейности была принята величина “стрелки” функции  $Nl(\text{Im}_c)$  по оси абсцисс  $\Delta_r = Nl^{-1}(0,5) - 0,5$ , где  $Nl^{-1}$  – функция, обратная  $Nl$ . На рис. 3 приведена усредненная по ансамблю из 20 реализаций зависимость величины

$$\Delta_N = \frac{2(d_C^{10} - d_{CNI}^{10})}{d_C^{10} + d_{CNI}^{10}}$$

от  $\Delta_r$ , а в табл. 3 – для каждой точки на рис. 3 даны описывающие нелинейность ИО функции  $Nl(Im_c)$  и соответствующие значения  $r$  и  $\Delta_r$ , которые определялись как видом  $Nl(Im_c)$ , так и значениями входящих в выражение для  $Nl(Im_c)$  параметров. На рис. 3 расчетные значения аппроксимированы полиномом 3-ей степени, средний квадрат отклонения аппроксимирующей кривой 0,002.

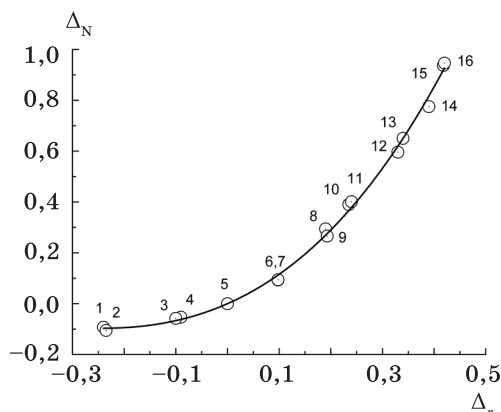


Рис. 3. Зависимости относительной оценки “цикла” от оценки нелинейности итерирующего отображения. Цифры – номера точек.

Таким образом, схема голографии Фурье с обращением волновых фронтов в плоскостях изображений и корреляций, реализующая модель двухслойной нейронной сети, может рассматриваться как открытая диссипативная система. Диссипативный фактор – фундаментальное физическое явление дифракции, в данном случае, дифракция опорного изображения, представляющего индексный образ, на голограмме.

Дифракция на голограмме обеспечивает формирование у понятия, порождаемого по модели индуктивного обобщения, внутренней коррелированности, стремящейся к внутренней коррелированности индексного образа. Этот механизм полностью соответствует

1. пониманию внутренней коррелированности как фундаментального атрибута информации [12],
2. пониманию индукции как частного случая обучения, направленного на формирование базы знаний [9],
3. концепции порождения информации как формирования диссипативных структур (в данном случае – физически реального паттерна внутренней репрезентации абстрактного понятия) в открытых неравновесных системах [13–15].

Таблица 3. Эпсликация к рис. 3

№ точки на рис. 3	$Nl(Im_c)$	$r$	$\Delta_r$
1	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	0,170	-0,240
2	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,065	-0,235
3	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,337	-0,100
4	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	0,379	-0,09
5	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,5	0
6	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	0,621	0,098
7	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,663	0,098
8	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,837	0,190
9	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	0,754	0,193
10	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	0,935	0,235
11	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	0,8289	0,240
12	$Nl(Im_c) = (\tanh(Im))^6$	1	0,33
13	$Nl(Im_c) = (\cosh(Im))^5$	1	0,34
14	$Nl(Im_c) = A[B + D \exp(-EIm_c)]^{-1}$	1	0,39
15	$Nl(Im_c) = (AIm_c - B)(D +  AIm_c - B )^{-1}$	1	0,418
16	$Nl(Im_c) = (Im)^8$	1	0,42

Открытость рассмотренной системы обеспечивает индексный образ (опорное изображение). Дифракция индексного образа на голограмме при рассмотрении схемы как интеллектуальной системы выполняет соотношение порождаемой гипотезы понятия с реальностью. Соответственно, степень нелинейности итерированного отображения может трактоваться в терминах интеллектуальной системы как “сила привычки”, стремящейся вернуться к ранее известному, к сложившемуся стереотипу согласно [23], а дифракция на голограмме – как соотношение сложившихся стереотипов с реальностью.

С точки зрения порождения понятия как создания информации системой (рис. 1) представляет интерес трактовка роста значения отношения  $d_c/d_R$  со смещением положения неподвижной точки  $r$  вниз (рис. 2). Рост отношения  $d_c/d_R$  отображает установление “дальних” связей в порождаемом паттерне с одновременной потерей детализации. В то же время, в свете проблемы адекватности гипотезы трактовка роста значений  $d_c/d_R \gg 1$  как роста общности формируемого понятия представляется недостаточно обоснованной, поскольку максимальная степень адекватности в плане соотношения с индексным образом соответствует  $d_c/d_R = 1$ . Более того, при  $r > \alpha$  имеет место инверсия “цикла” – дифракция на голограмме уменьшает величину  $d_c$  относительно  $d_{CNI}$ , т. е. в данном случае дифракция на голограмме также играет роль соотношения гипотезы с реальностью, ограничивая излишне длинные связи. Вопрос заслуживает дальнейшего исследования.

Отметим, что формирование у порождаемого понятия внутренней коррелированности, т. е.

становление внутренней структуры, в большей степени соответствует развиваемому в рамках когнитивного подхода пониманию понятия как категории, а не класса объектов, обладающих общим набором признаков [1]. Понимание понятия как категории подразумевает наличие прототипов, соответственно, принадлежность образа к категории, т. е. степень его охвата понятием, определяется в первую очередь расстоянием образа до прототипа. В рамках развиваемого подхода в качестве метрики использована величина скалярного произведения, а сам подход исходит из классического определения понятия как класса, оперируя признаками. Поскольку скалярное произведение не в полной мере удовлетворяет требованиям к метрике в рамках категориального подхода, то для перехода к рассмотрению понятия как категории необходимо определить физически реализуемую в схеме голографии Фурье метрику, позволяющую решать задачу категоризации. На сегодня этот вопрос остается открытым.

Рассмотренный механизм формирования у паттерна порождаемой гипотезы внутренней коррелированности, имеющий сугубо физическую природу, соответствует ключевому тезису когнитивного подхода к обработке информации, постулирующему существенную зависимость когнитивных структур и механизмов субъекта от его сенсорных особенностей, физического и социального опыта [1]. Фактически, этот тезис представляет собой частную форму постулата о физической обоснованности математических моделей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 12-01-00418-а) и Минобрнауки РФ (проект рег. № 01201253217).

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О.П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 32–42.
2. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. Нейронные сети и экспертные системы: перспективы интеграции // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 4. С. 121–145.
3. Леутин В.П., Николаева Е.И. Функциональная асимметрия мозга. Мифы и реальность. СПб.: Речь, 2005. 368 с.
4. Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в ИИ // Известия АН. Сер.: Теория и системы управления. 1995. № 5. С. 3–23.
5. Тушканов Н.Б., Тушканова О.Н. К построению мультисенсорных систем: принципы работы неокортекса головного мозга при распознавании объектов внешнего мира // Тр. конгр. по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS-IT'12. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. Т. 2. С. 373–378.
6. Спрингер С., Дейч Г. Левый мозг, правый мозг. М.: Мир, 1983. 256 с.
7. Кузнецов О.П., Марковский А.В., Шипилина Л.Б. Голографические механизмы обработки образной информации. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2007. 82 с.



8. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. Изд. 2-е. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 712 с.
  9. *Барский А.Б.* Логические нейронные сети. М.: Бином, 2007. 351 с.
  10. *Павлов А.В.* Возможность реализации правдоподобных рассуждений методом голографии Фурье // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 24–33.
  11. *Павлов А.В.* Об обусловленности характеристик понятия при его индуктивном формировании на нейросетях со связями по схеме голографии Фурье // VII Межд. научно-практ. конф. “Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте”. Сб. научных трудов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. Т. 1. С. 349–359. 598 с. ISBN 978-5-9221-1327-4.
  12. *Корогодин В.И.* Информация и феномен жизни. Пущино: АН СССР, 1991. 202 с. ISBN 5-201-10836-X.
  13. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002. 284 с. ISBN 5-8037-0101-7.
  14. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. Изд.3-е, доп. М.: URSS, 2009. 300 с. ISBN 978-5-397-00207-3.
  15. *Пригожин И.Р., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. К решению парадокса времени: Пер. с англ. / Под ред. Аршинова В.И. Изд.6-е. М.: КомКнига, 2005. 232 с. ISBN 5-484-00180-3.
  16. *Павлов А.В.* Об обусловленности характеристик понятия, формируемого нейросетью со связями в пространстве Фурье // XIII Нац. конф. по искусственному интеллекту. Тр. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. Т. 1. С. 358–366. ISBN 978-5-361-00181-1.
  17. *Бекяшева З.С., Васильев В.Н., Павлов А.В.* Модели выдвижения гипотез в схеме голографии Фурье // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 37–46.
  18. *Carpenter G. A., Grossberg S.* ART 2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns // Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 4919–4930.
  19. *Шубников Е.И.* Отношение сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. № 2. С. 450–456.
  20. *Кроновер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
  21. *Магницкий Н.А.* Распознавание образов распределенными динамическими системами // Доклады АН. 1994. Т. 338. № 3. С. 320–321.
  22. *Кулешов А.М., Шубников Е.И., Смаева С.А.* Об оптимальности голографического согласованного фильтра // Опт. и спектр. 1986. Т. 60. № 6. С. 1273–1276.
  23. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Никитин А.П.* О возможном механизме “интуитивного” и “логического” в нейрокомпьютинге. М.: ФИАН, 2009. 32 с.
  24. *Фоминых И.Б.* О технологии решения творческих задач // Сб. тр. VIII Нац. конф. по искусственному интеллекту “КИИ-2002”. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 1. С. 519–526.
-