

МОДЕЛИ ВЫДВИЖЕНИЯ ГИПОТЕЗ В СХЕМЕ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

© 2013 г. З. С. Бекяшева; В. Н. Васильев, чл.-корр. РАН; А. В. Павлов, канд. техн. наук

СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: zoya.bekyasheva@phoi.ifmo.ru, pavlov@phoi.ifmo.ru

Применительно к описанию схемы голографии Фурье с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости как реализации двухслойной нейронной сети, рассмотрены две модели выдвижения гипотез: линейной регрессии условий задачи по знаниям и индуктивного вывода. Определены и численно исследованы факторы, влияющие на адекватность порождаемых гипотез условиям задачи. Показано, что адекватность гипотез возрастает с ростом числа пространственных степеней свободы паттернов, представляющих условия задачи (обобщенной частоты), при этом в силу внутренней коррелированности (как атрибута информации) увеличение размера паттерна более эффективно влияет на адекватность, чем высокочастотная фильтрация.

Ключевые слова: голография, искусственный интеллект, образное мышление, выдвижение гипотез, случайный процесс.

Коды OCIS: 090.6186, 070.6110, 100.2960, 070.4790.

Поступила в редакцию 14.11.2012.

Введение

Развитие оптических информационных технологий основано на прогрессе в двух тесно связанных направлениях – разработке элементной базы (hardware) на новых физических принципах, с одной стороны, и моделей обработки информации (software), адекватных реализуемым физическим механизмам и явлениям, с другой [1]. В этой связи представляют интерес подходы и модели, изначально разработанные в рамках фундаментальной проблемы искусственного интеллекта (ИИ) безотносительно к оптическим технологиям. Возможность реализации моделей ИИ методами голографии основана на наличии ряда глубоких аналогий между свойствами голограммы и мозга, замеченных основателями голографии Д. Габором и Ю.Н. Денисюком [2, 3] и положенных в основу голографической парадигмы в ИИ [4].

На сегодня большая часть работ, выполненных силами оптиков в рамках голографической парадигмы, посвящена реализации контекстно-адресуемой (ассоциативной) памяти [5, 6] как альтернативе памяти с прямым указанием адреса. Память – фундамент интеллек-

та, но основная функция интеллекта не память как таковая, а решение задач. Известны работы по голографическим реализациям логических вентилях и процессоров нечеткой логики [6], в том числе логики немонотонной, в которой значение истинности заключения может меняться при поступлении новой информации [7, 8]. Эти реализации соответствуют традиционному информационному подходу к решению задач, предполагающему обработку информации на основе имеющихся знаний и формирование достоверного вывода – логического заключения.

Вместе с тем, важнейший атрибут интеллекта, определяющий его адаптационные и познавательные (когнитивные) способности, но не учитываемый в рамках информационного подхода, – механизм выдвижения гипотез как первоначального, не достоверного, но лишь правдоподобного суждения о наблюдаемом факте, подлежащего затем обязательной верификации на соответствие действительности [9, 10]. Этот подход к обработке информации известен под названием когнитивного.

Принято подразделять гипотезы на творческие [11], абдуктивные (объясняющие наблюдаемые факты), индуктивные (расширяющие

теорию) [12] и др. В работе [13] был предложен подход к реализации одного из возможных механизмов выдвижения творческих гипотез в схеме голографии Фурье с обращением волнового фронта в плоскостях изображений и корреляций (рис. 1а), которая может рассматриваться как реализация двухслойной нейронной сети (НС) со связями слоев в пространстве Фурье (рис. 1б). В работе [14] показана возможность реализации в схеме рис. 1а механизмов выдвижения абдуктивной и индуктивной гипотез.

Следующий, после выдвижения гипотезы, этап решения задачи в рамках когнитивного подхода – верификация гипотезы на соответствие реальности. Вопрос адекватности порождаемой гипотезы реальности многогранен и включает в себя, в числе прочих, аспект адекватности гипотезы условиям задачи. Такой подход обоснован тем, что образная обработка информации биологическими системами, как естественными прототипами систем ИИ, крайне упрощенно может быть представлена в следующем виде [15]:

1. Информация из внешнего мира воспринимается сенсорами, преобразуется сенсорными трактами и отображается на коре головного

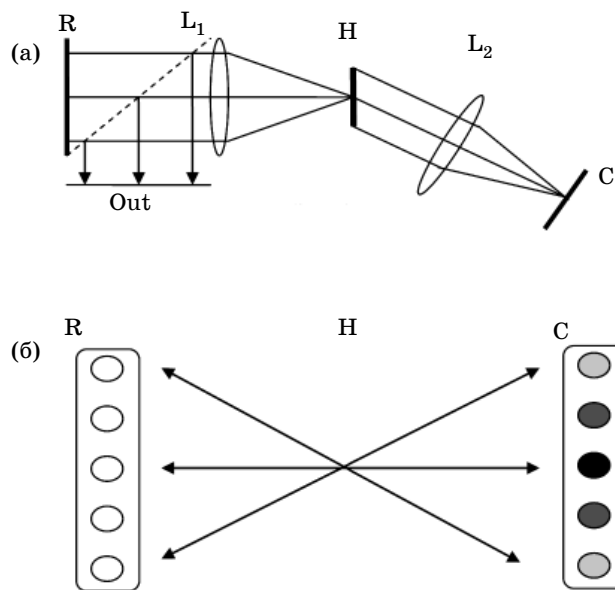


Рис. 1. а – схема голографии Фурье с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости. Н – голограмма, L_1 , L_2 – фурье-преобразующие линзы, С – корреляционная плоскость; б – двухслойная нейронная сеть, соответствующая схеме голографии Фурье, R и С – нейронные слои, Н – матрица связей слоев (голограмма Фурье).

мозга в виде пространственной картины распределения нейронной активности – паттернов внутренней репрезентации информации (ПВР).

2. Эти ПВР сравниваются с имеющимися знаниями, которые хранятся в системе в виде весов связей нейронов – матрицы Н. Результат сравнения формируется также в виде картины нейронной активности – ПВР-С.

3. Если результат сравнения признается удовлетворительным, т. е. воспринятая информация соответствует внутренней картине мира, то субъективно проблемы нет. В противном случае, если результат сравнения неудовлетворителен, то поступившая информация субъективно проблемна – несоответствие воспринятой и запомненной ранее информации является задачей, которую необходимо решить. Соответственно, ПВР воспринятой информации в этом случае является ПВР условий данной задачи (ПВР-УЗ).

4. Решение задачи, как устранение несоответствия между воспринятой информацией и внутренней картиной мира, возможно разными методами, в том числе и изменением внешнего мира. В рамках настоящего рассмотрения нас интересуют только интеллектуальные методы – обработка мозгом ПВР-УЗ и формирование ответа также в виде ПВР. Соответственно, абстрагируясь от вопроса преобразования информации в ПВР сенсорами и сенсорными трактами, ограничим рассмотрение только процессом обработки ПВР нейронной сетью, акцентировав внимание на факторах, определяющих адекватность ПВР гипотезы (ПВР-Г) паттерну условий задачи.

В свою очередь, в рамках данного аспекта возникает вопрос определения критерия и меры адекватности. Один из возможных подходов, не претендующий на универсальность, но соответствующий вышеописанной концепции образного мышления, – выбор в качестве меры адекватности величины изменения оценки статистических характеристик паттернов, репрезентирующих условия задачи и гипотезу. Подход правомочен в силу того, что реальная информация, как правило, неоднородна (нестационарна) [16, 17]. Соответственно, и ПВР также должны быть неоднородны, а изменение оценок однородности ПВР в процессе обработки означает снижение адекватности гипотезы условиям задачи.

В рамках такого подхода в работах [18, 19] был исследован один из аппаратных факторов,

влияющих на адекватность гипотез, формируемых схемой рис. 1а в рамках модели линейной регрессии условий задачи по знаниям [13] – фильтрации, обусловленной нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред. В работе [20] исследовано влияние размера ПВР-УЗ на адекватность формируемых схемой гипотез. В качестве меры адекватности в [18–20] рассмотрено изменение оценок стационарности по двум первым статистическим моментам.

Вместе с тем в упомянутых работах исследовалась только модель выдвижения гипотез в рамках линейной регрессии условий задачи по знаниям [13] и учитывался только амплитудный спектр ПВР. В то же время, при всем различии как моделей выдвижения творческих [13], абдуктивных и индуктивных гипотез [14], так и режимов работы схемы голографии Фурье, при их порождении, использование единой схемы рис. 1а и НС рис. 1б позволяет объединить их в одной модели и рассмотреть общие аппаратные факторы, влияющие на адекватность гипотез. В настоящей статье, в развитие работ [13, 14, 18–21], исследовано влияние на адекватность условиям задачи гипотез, порождаемых схемой голографии Фурье с обращением волновых фронтов в плоскостях изображений и корреляций, размера обрабатываемого изображения и его пространственно-частотного спектра, включая спектр фаз.

1. Подход к модели выдвижения гипотез

Схема голографии Фурье с обращением волновых фронтов в плоскостях изображений и корреляций, представленная на рис. 1а, соответствует модели двухслойной НС рис. 1б с матрицей двунаправленных связей, формируемых в пространстве Фурье. Матрица связей реализуется голограммой Н. Плоскость изображений в оптической схеме рис. 1 обозначена литерой R, поскольку в терминах НС модели она реализует слой репрезентаций R, в котором формируется ПВР-УЗ, а плоскость корреляций С – слой сравнения С. В дальнейшем, с учетом нацеленности рассмотрения на модели, выходящие за рамки классической корреляционной обработки изображений, мы используем для плоскости С термин “плоскость сравнения” вместо более традиционного для голографии Фурье “корреляционная плоскость”.

Согласно биологически мотивированному (нейросетевому) подходу, знания хранятся

в интеллектуальной системе в виде матрицы весов связей, ассоциирующих два (как минимум) ПВР. Применительно к рассматриваемой схеме рис. 1 обозначим эти паттерны Im_R и Im_C – эталонные ПВР в слоях R и С соответственно, с которых записана голограмма Фурье $H_{R \rightarrow C}$. Ограничив анализ интересующим нас +1-м порядком дифракции, опишем голограмму:

$$H_{R \rightarrow C}(v_x, v_y) = \eta \left(F^* (Im_R(x, y)) F (Im_C(x, y)) \right), \quad (1)$$

где F – символ преобразования Фурье, астериск обозначает комплексное сопряжение, v_x, v_y – пространственные частоты, η – оператор, описывающий фильтрацию, обусловленную нелинейностью экспозиционных характеристик голографической регистрирующей среды (ГРС). При предъявлении НС, обученной согласно (1), в плоскости R ПВР воспринятой информации $Im_{\text{пер}}(x, y)$, в слое С формируется паттерн сравнения ПВР-С:

$$Im_{\text{comp}}(\zeta, \eta) = \left(Im_{\text{пер}}(x, y) \otimes (Im_R(x, y) * Im_C(x, y)) \right)_{\eta}, \quad (2)$$

где \otimes и $*$ – символы операций корреляции и свертки соответственно, (ζ, η) – координаты в плоскости сравнения С, а нижний индекс η обозначает фильтрацию на голограмме (1), обусловленную нелинейностью экспозиционных характеристик ГРС [22–24].

Обозначив Nl нелинейный оператор фазо-сопрягающего зеркала в плоскости сравнения С, получим выражение для ПВР-Г Im_{hyp} , восстановленного в плоскости R в обратном ходе лучей, –

$$Im_{\text{hyp}}(x, y) = Im_{\text{comp}}(\zeta, \eta) * F(H_{C \rightarrow R}), \quad (3)$$

где $H_{C \rightarrow R}$ – голограмма, используемая на этапе обратного хода лучей от плоскости С к плоскости R. Два вышеупомянутых типа гипотез – в рамках модели линейной регрессии условий задачи по знаниям, используемой для порождения творческих [21], и индуктивных [14] гипотез, отличаются условиями записи голограмм $H_{R \rightarrow C}$ и $H_{C \rightarrow R}$. Рассмотрим их ниже.

2.1. Выдвижение гипотез в рамках модели линейной регрессии

При выдвижении гипотез в рамках модели линейной регрессии [25, 26] обе голограммы $H_{R \rightarrow C}$ и $H_{C \rightarrow R}$ записываются с точечным опорным источником, т. е. $Im_C = \delta$, где δ обо-

значает дифракционно ограниченный точечный источник. Голограмма $H_{R \rightarrow C}$ (1) записывается как согласованная, а голограмма $H_{C \rightarrow R}$ – как инверсная и реализуется как “сэндвич” [27]:

$$H_{R \rightarrow C}^{\text{inv}}(v_x, v_y) = \left[\frac{1}{F(Im_R(x, y))F^*(Im_R(x, y))} \right] \eta(F^*(Im_R(x, y))), \quad (4)$$

где выражение в квадратных скобках описывает амплитудный фильтр. В этом случае, как показано в [26], ПВР-Г описывается моделью линейной регрессии ПВР-УЗ по эталонному ПВР $Im_R(x, y)$, представляющему знания:

$$Im_{\text{hyp}}^{\text{Reg}}(x, y) = F \left[\frac{F(Im_{\text{comp}}(x + \zeta, y + \eta))}{F^*(Im_R(x, y))} \right]. \quad (5)$$

Модель линейной регрессии представляет интерес в контексте подхода к решению задачи как к достраиванию субъективно неполного ПВР-УЗ [28], т. е. актуальна в виде линейного предсказателя – частного случая модели регрессии, описывающего ПВР-Г как линейное предсказание ПВР-УЗ при рассмотрении паттернов как ограниченных реализаций случайного поля [25]:

$$Im_{\text{pred}}(x_k, y_l) = \int_{x_{\min}}^{x_0} \int_{y_{\min}}^{y_0} Im_{\text{per}}(x_0 - x, y_0 - y) a(x, y) dx dy. \quad (6)$$

Здесь x_k, y_l – координаты точки вне апертуры кадрового окна, ограничивающей $Im_{\text{per}}(x, y)$; $a(x, y)$ – весовая функция, которая находится из решения уравнения

$$\int_{x_{\min}}^{x_0} \int_{y_{\min}}^{y_0} a(x, y) C(|x - \zeta|, |y - \eta|) dx dy = C(x_k + \zeta, y_l + \eta), \quad (7)$$

где $C(\zeta, \eta)$ – функция корреляции поля, так называемая “теоретическая” (ТКФ) [29].

Из (7) с очевидностью следует отличие реализации данной модели схемой рис. 1а от широко известной модели автоассоциативной памяти, также реализуемой в схеме рис. 1а. В модели линейного предсказателя используются области КФ вне глобального максимума автокорреляционной функции (ГМ АКФ), в то время как в модели ассоциативной памяти, напротив, используется только ГМ АКФ.

В последнем случае это достигается введением в слое С такого нелинейного оператора, чтобы ПВР-С в результате итерационного процесса сводился к дельта-функции:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (Im_{\text{comp}}^n(\zeta, \eta)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (Im_R(x, y) \otimes Im_R(x, y))^n = \delta, \quad (8)$$

где верхний индекс n – номер итерации. В результате, из всего ПВР-С (2) выделяется только ГМ АКФ, который, как дифракционно ограниченный точечный источник, восстанавливает в плоскости R изображение эталона:

$$Im_{\text{hyp}}(x, y) = Im_R(x, y) * \delta.$$

Этот вариант формирования гипотезы, как вспоминание ранее известного эталона, в силу его очевидности подробно рассматривать не будем.

Применительно к вопросу адекватности гипотез (5), формируемых согласно модели регрессии (6, 7), важно, что для полей с экспоненциальным и иными быстроспадающими спектрами мощности, характерными для реальной информации [17, 18] и отображающими ее внутреннюю коррелированность, теоретическая КФ обладает свойством монотонности [29]. В то же время пространственная ограниченность паттерна $Im_{\text{per}}(x, y)$ апертурой кадрового окна ($x_{\min}, x_0, y_{\min}, y_0$) обуславливает существенную немонотонность измеренной КФ (ИКФ) в области вне ГМ АКФ – появление боковых максимумов и минимумов, амплитуды которых существенно меняются от реализации к реализации и зависят как от размера паттерна, так и от его спектра фаз. Поскольку именно эти БМ ИКФ используются схемой рис. 1а для вычисления предсказания (7) (в то время как модель требует вычислений на основе ТКФ), эта вариативность амплитуд БМ ИКФ ведет к снижению адекватности формируемой гипотезы (5) и, следовательно, подлежит оценке.

2.2. Численное исследование влияния ограниченности паттерна на характеристики корреляционной функции

На данном этапе методом численного моделирования исследовано влияние характеристик ПВР-УЗ с учетом спектра фаз и фильтрации, обусловленной нелинейностью экспозиционных характеристик ГРС, на оценки

отклонения ИКФ от ТКФ. В предположении разделимости переменных в функции, описывающей ПВР как реализацию случайного поля, перейдем (для простоты, но без потери общности) к функциям одной переменной и опишем ПВР как реализацию длиной $2L$ случайного процесса с экспоненциальным спектром амплитуд и случайным спектром фаз, равномерно распределенных на интервале $[0, 2\pi]$

$$Im_R(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{i}{N}\right) \cos(ix\omega_1 - \varphi_i), \quad (9)$$

где N – параметр, ω_1 – нижняя граничная круговая частота, φ_i – фаза. Число пространственных степеней свободы паттерна, описывающее его информационную емкость [30, 31], определим как его обобщенную частоту $\Omega = L/r$, где r – радиус корреляции, r и L измерялись в пикселах.

Моделировались два оператора η : линейный и, с учетом результатов предыдущих исследований [18–20], сигмоидальный, адекватный условиям записи высокочастотных голограмм (фильтр высоких частот)

$$\eta(\omega) = \left(1 + \exp\left(-\left(\frac{\omega - 150}{100}\right)\right)\right)^{-1}, \quad (10)$$

Параметры фильтра подобраны так, чтобы он достаточно сильно ослаблял низкие частоты. Однако поскольку фильтрация ведет к изме-

нению r и, тем самым, величины Ω , то уменьшение радиуса корреляции происходило бы не слишком быстро для того, чтобы избежать разрушения внутренней коррелированности паттернов, актуального при высокочастотной фильтрации [22, 23].

Отклонение (γ) ИКФ от ТКФ оценивалось по формуле

$$\gamma_N(\zeta/r) = \frac{\sigma(C(\zeta/r))}{\sum_{i=1}^n C(\zeta/r)_i} \quad (11)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) от математического ожидания ИКФ ПВР с разными спектрами фаз, распределенными равномерно на $[0, 2\pi]$, $n = 100$, $\sum_{i=1}^n C(\zeta/r)_i$ – математическое ожидание ИКФ. Обобщенная координата ζ/r введена для учета влияния фильтрации на r и, тем самым, на величину Ω . Увеличение ансамбля до $n > 100$ на результаты, приведенные на рис. 2а и 2б, не влияло.

При $2L = 2048$ для ПВР-УЗ с экспоненциальным спектром относительная ошибка превышает единицу уже при $\zeta/r = 4$, при увеличении длины ошибка растет медленнее. С увеличением $2L$ ошибка уменьшается, поскольку измеренные ИКФ приближаются к ТКФ. Сравнение рис. 2а и 2б показывает, что высокочастотная фильтрация ведет к уменьшению ошибки, а эффективность фильтрации возрастает с увеличением $2L$. Вместе с тем, очевидно,

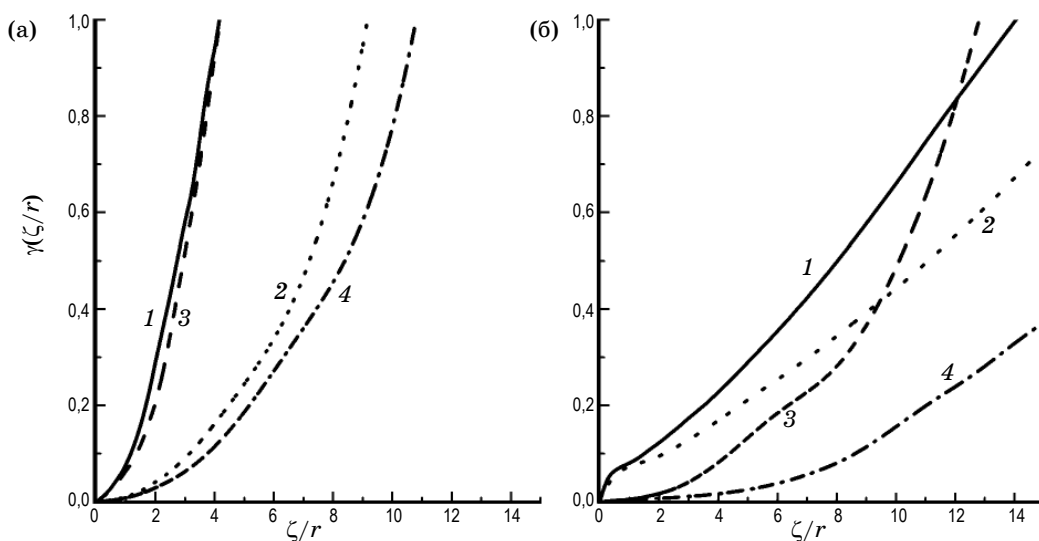


Рис. 2. Относительная ошибка КФ реализации с экспоненциальным спектром (а) и при при высокочастотной фильтрации (б). а – $\Omega = 137$ (1, 2) и при $\Omega = 205$ (3, 4), б – $\Omega = 157$ (1, 2) и при $\Omega = 390$ (3, 4) и $3 - 2L = 2048$ пикс, 2 и 4 – $2L = 8192$ пикс.

что влияние длины реализации $2L$ и радиуса корреляции r , нивелированное в интегральной величине Ω , на оценку (11) различно – размер ПВР оказывает преобладающее по сравнению с частотой влияние на оценку (11). Для иллюстрации этого эффекта на рис. 3 приведены зависимости (11) для реализаций различных длин при высокочастотной фильтрации (10).

На рис. 3 хорошо заметен, казалось бы, парадоксальный эффект – для одной длины (8192 пикс) при большей обобщенной частоте (кривая 1) ошибка больше, чем при меньшей (кривая 2). Этот результат становится понятным при сравнении радиусов корреляции, соответствующих этим зависимостям – высокочастотная фильтрация для кривой 1 имеет результатом дельта-коррелированность ПВР. Соответственно, стал заметен эффект декорреляции – возрастание относительных амплитуд боковых максимумов ИКФ и, как результат, рост ошибки (11).

Таким образом, ошибка формирования ИКФ в области вне ГМ АКФ относительно теоретической КФ зависит от информативности паттерна, которая может быть оценена величиной обобщенной частоты – отношения размера ПВР к радиусу корреляции. Поскольку в модели линейной регрессии используются именно эти области КФ, то эта ошибка определяет и ошибку реально формируемой схемой гипотезы относительно даваемой теоретической моделью, т. е. ее адекватность условию задачи. Эта ошибка может быть минимизирована двумя путями – фильтрацией, ведущей к уменьшению радиуса корреляции, и, что более эффективно, увеличением размера паттерна условий задачи, т. е. увеличением информативности условий задачи. При этом существенно, что хотя оба метода и ведут к одному результату – повышению информативности паттерна условий задачи, но они не равноценны. Увеличение размера паттерна более эффективно с точки зрения минимизации ошибки, чем фильтрация. Это объясняется тем, что фильтрация представляет собой попытку “выжать” максимум из имеющейся информации, без увеличения ее фактического объема, а увеличение размера паттерна увеличивает объем информации в реальности.

3.1. Выдвижение индуктивной гипотезы

Для выдвижения индуктивной гипотезы [14] на этапе прямого $R \rightarrow C$ прохождения све-

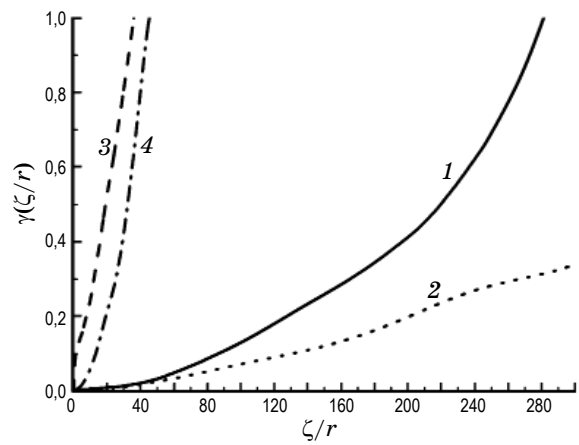


Рис. 3. Относительная ошибка АКФ при фильтрации сигмоидальным фильтром для реализаций: 1 – $2L = 8192$ пикс, $\Omega = 4096$, 2 – $2L = 8192$ пикс, $\Omega = 2731$, 3 – $2L = 2048$ пикс, $\Omega = 5321$, 4 – $2L = 8192$ пикс, $\Omega = 512$.

та используется голограмма (1), при этом паттерн $Im_C(x, y)$, являющийся в терминах индуктивного вывода индуцируемым образом, по условиям задачи индукции в общем не точечный источник, т. е. $Im_C(x, y) \neq \delta$. На этапе обратного прохождения света $C \rightarrow R$ голограмма каждый раз перезаписывается, причем также в соответствии с (1) и условием $Im_C(x, y) \neq \delta$. Динамика системы, т. е. сходжение итерационного процесса, определяется конкуренцией двух факторов – нелинейного обращения волнового фронта в слое С и дифракции на голограмме.

Нелинейность в слое С согласно [14] вводится как метод расширения спектра индуцируемого образа в область низких пространственных частот исходя из достижения условия

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left| F \left(Im_C^n(x, y) \right) \right| \right) = \text{const}, \quad (12)$$

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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(im_C^n(\zeta, \eta) \right) = \delta, \quad (13)$$

где im_C^n – элемент индуцируемого паттерна Im_C^n на n -й итерации [14]. Отметим отличие формул (13) и (8): условие (8) введено для всего ПВР Im_{comp} , а (13), как следствие из (12), – для элементов im .

На каждом шаге итерационной процедуры, после обращения волнового фронта в слое С, записывается новая голограмма

$$H_{R \rightarrow C}^n(v_x, v_y) = \eta \left(F^* (Im_R(x, y)) F (Im_{\text{comp}Nl}^n(x, y)) \right), \quad (14)$$

где символ Nl в нижнем индексе обозначает образ в слое С, формируемый после нелинейного обращения волнового фронта на n -й итерации.

Затем голограмма (14) восстанавливается паттерном Im_R , который представляет индексный образ, и в слое С формируется паттерн

$$Im_{\text{comp}}^{n+1}(\zeta, \eta) = \left(Im_R(x, y) \otimes Im_{\text{comp}}^n(x, y) * Im_R(x, y) \right)_{\eta}. \quad (15)$$

При этом дифракция на голограмме (14), эффективный размер которой определяется как механизмами формирования интерференционной картины, так и ограниченностью динамического диапазона ГРС [32], ведет к расширению элементов отклика (15) относительно результата нелинейного обращения волнового фронта, которое может быть представлено в форме

$$\left(im_{\text{comp}}^{n+1} \right)_{\alpha} > \left(im_{\text{comp}Nl}^n \right)_{\alpha}, \quad (16)$$

где α – уровень измерения ширины элемента разрешения. Таким образом, схема рис. 1 при выдвигании индуктивных гипотез может быть представлена в виде кольцевой автоколебательной системы с голограммой – адаптивным фильтром высоких частот и фазосопрягающим зеркалом в слое С – нелинейным звеном, характеристики которого определяют характер динамики системы. В этой системе дифракция на голограмме играет роль диссипативного фактора, влияющего на возможные траектории системы, а индексный образ, восстанавливающий голограмму на каждой итерации, обеспечивает приток энергии, т. е. система является открытой.

Соответственно, представляет интерес оценка взаимного влияния на динамику системы двух разнонаправленных механизмов – нелинейного отображения, ведущего к (13), и дифракции на голограмме, определяющей (15). В первом приближении важна оценка двух факторов – влияние размера ПВР-УЗ $2L$ и влияние радиуса корреляции r , с учетом спектра фаз ПВР-УЗ, а также нелинейности в слое С на сходимость процесса.

3.2. Численное моделирование влияния кадрового окна и спектра фаз на радиус корреляции и динамики системы

При моделировании использована модель ПВР (9) и четыре модели фильтров:

– с неограниченным (линейным) динамическим диапазоном,

– фильтр низких частот – функция Гаусса $\exp(-\omega^2/50)$,

– фильтр высоких частот (сигмоидальный) $(1 + \exp(-(\omega - 150)/100))^{-1}$,

– полосовой фильтр – смещенная функция Гаусса $\exp(-(\omega - 140)^2/120)$.

Условия моделирования аналогичны описанным в разделе 2.2. Поскольку согласно (13) итерационный процесс в слое С направлен на уменьшение размера элемента разрешения паттерна, то интерес представляют прежде всего отклонения радиуса корреляции ИКФ от радиуса ТКФ в сторону больших значений. Это обусловлено тем, что такие отклонения увеличивают количество итераций, необходимых для достижения устойчивого решения, в то время как отклонения радиусов корреляции в меньшую сторону, напротив, ускоряют процесс схождения к стабильному состоянию.

На рис. 4 приведены зависимости СКО радиусов корреляции от математического ожидания (в большую сторону) в зависимости от радиуса корреляции по уровню $\alpha = 0,5$ для разных длин реализаций. Влияние кадрового окна на КФ реализации в целом и, в частности на радиус корреляции, ярко выражено в диапазоне низких частот и ослабевает как с ростом частоты, в том числе в результате фильтрации, так и длины реализации. Вид зависимостей определяется, в том числе и тем, что уменьшение радиуса корреляции в результате влияния АКФ кадрового окна происходит не пропорционально длине реализации, а в меньшей степени.

Для оценки совокупного влияния этого фактора и нелинейности Nl в слое С моделировался итерационный процесс для четырех функций Nl , отличающихся степенью своей нелинейности: сигмоидальной, квадратичной, четвертой и восьмой степени. Зависимости r от номера итерации приведены на рис. 5, демонстрирующем сходимость системы к аттрактору, параметры которого зависят от соотношения нелинейности в слое С и характеристик фурье-образа индексного

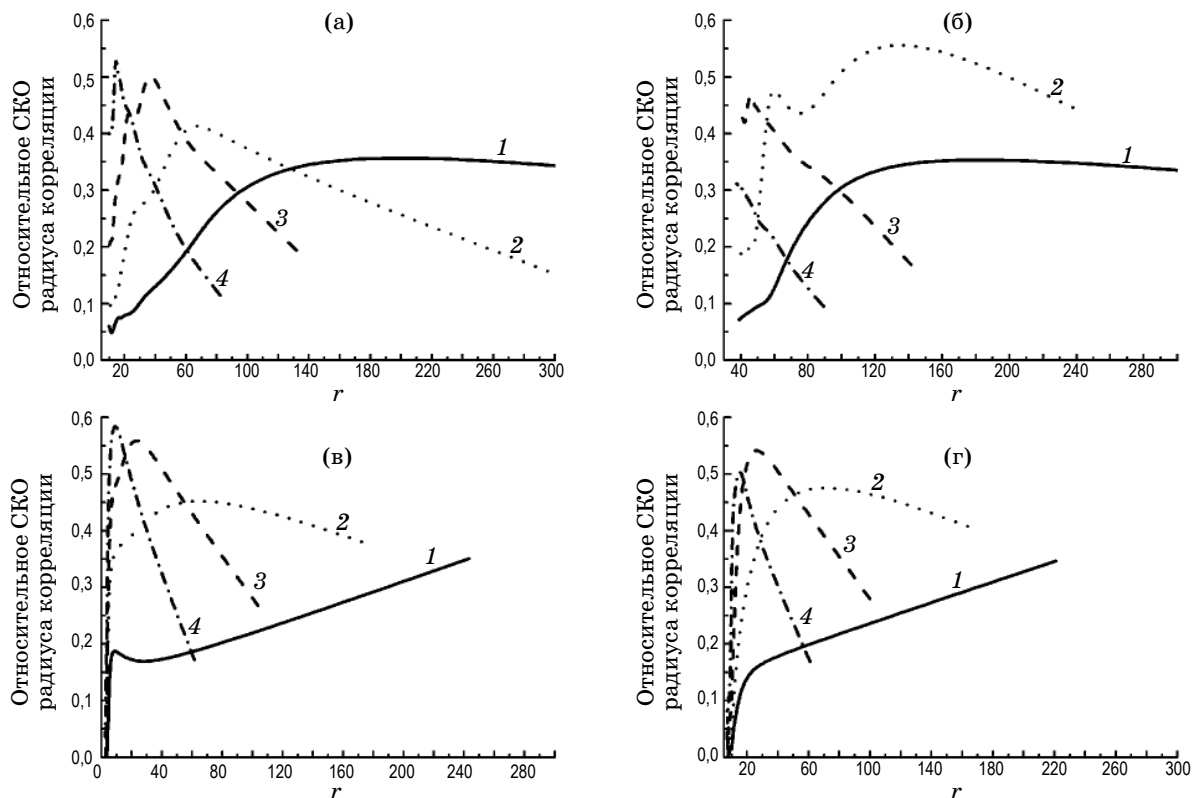


Рис. 4. Зависимости величин средневладратичных отклонений радиусов корреляции от среднего по ансамблю в 100 реализаций значений для разных длин реализаций: 1 – $2L = 2048$, 2 – $2L = 1024$, 3 – $2L = 512$, 4 – $2L = 256$ пикс. а – до фильтрации, б – низкочастотный фильтр Гаусса, в – высокочастотная фильтрация (сигмоидальный фильтр), г – полосовая фильтрация смещенной функцией Гаусса.

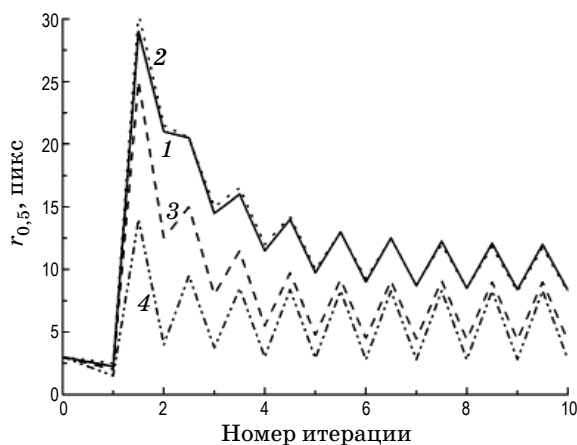


Рис. 5. Динамика НС рис. 1 в слое С при линейной записи весов связей и различных типах нелинейности в слое С: 1 – сигмоидальной, 2 – квадратичной, 3 – четвертой степени, 4 – восьмой степени.

образа Im_R . Верхние значения “пилы”, наблюдаемой на рис. 5 в установившемся стабильном режиме, соответствуют радиусам корреляции, формируемым голограммой, т. е. до нелинейного отображения в слое С, нижние

значения – результату отображения на нелинейности. “Пила” отражает наличие в системе диссипативного фактора – дифракции на голограмме. С точки зрения оптимальных характеристик индуктивной гипотезы как понятия, эта “пила” отображает такое фундаментальное свойство информации, отличающее ее от шума, как наличие внутренней коррелированности. Нелинейное отображение как интеллектуальное усилие или “игра ума” ведет к разрушению внутренней коррелированности, тем большему, чем выше степень нелинейности, соответствующая неординарности мышления. Дифракция на голограмме, соответствующая ассоциативному обращению к имеющимся знаниям об устройстве мира, восстанавливает разрушенную внутреннюю коррелированность. Поскольку знания о мироустройстве формируются в интеллектуальной системе записью голограммы с индексным образом, представляющим реальность, внешнюю по отношению к системе, то он обеспечивает поступление в систему извне отрицательной энтропии, необходимой для выработки системой информации.

Заключение

Таким образом, схема голографии Фурье с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости может реализовать не только ставшую уже классической модель автоассоциативной памяти, но и модели порождения гипотез в рамках концепции образного мышления. При этом адекватность паттерна, представляющего порождаемую гипотезу, паттерну условий задачи, определяется, в числе прочих, характеристиками как паттернов условий задачи, так и элементов схемы – в первую очередь размером паттернов, определяемых апертурой кадрового окна, динамическим диапазоном голографических регистрирующих сред для записи голограммы Фурье, определяющим фильтрацию, и видом нелинейной функции фазосопрягающего зеркала в корреляционной плоскости. Два первых фактора в совокупности определяют число пространственных степеней свободы пат-

терна, с ростом которого растет и адекватность гипотезы условиям задачи. При этом размер паттерна имеет превалирующее значение по сравнению с фильтрацией. Характеристики формируемой гипотезы, как и скорость схождения системы к решению, определяются в значительной степени нелинейностью фазосопрягающего зеркала. Дифракция на голограмме, играющая роль диссипативного фактора в динамической системе, дает механизм восстановления внутренней коррелированности паттернов, возможно нарушенной при нелинейном отображении. Эти два реальных физических механизма достаточно условно могут быть соотнесены с ассоциативным обращением к имеющимся в системе знаниям о реальном мироустройстве, с одной стороны, и “силой ума”, пытающегося выйти за границы известного, с другой стороны.

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

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В., Симовский К.Р., Шполянский Ю.А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи. Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Под ред. Гурова И.П. и Козлова С.А. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 268 с.
2. Gabor D. Associative Holographical Memories // IBM J. of research and development. 1969. V. 13. № 2. P. 156–159.
3. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах // Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982. Т. 2. С. 691–729.
4. Прибрам К. Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти // Синергетика и психология. В. 1. “Методологические вопросы”. М.: МГСУ “Союз”, 1997.
5. Gurevich S.B., Gurevich B.S., Peckus A. The problems of holographic information recording and storage: modern state // Proc. SPIE. 2008. V. 7142. P. 71420X-1–71420X-7.
6. Павлов А.В. Фурье-голография в современной парадигме искусственного интеллекта // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 5. С. 44–53.
7. Алексеев А.М., Павлов А.В. Реализация нечеткой логики с исключениями методом фурье-голографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 4. С. 41–46.
8. Павлов А.В. Алгебра фурье-дуальных операций: логика с исключением // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 3. С. 26–38.
9. Гергей Т. Когнитивные системы // Труды IX Нац. конф. по искусств. интеллекту. М.: Физматлит, 2004. Т. 1. С. 3.
10. Моллер Р., Гросс Х.-М. Обнаружение совпадений и генерация гипотез – элементарная функция коры головного мозга // Синергетика и психология. В. 3. “Когнитивные процессы”. М.: Когито-Центр, 2004. С. 210–217.
11. Фоминых И.Б. О технологии решения творческих задач // Труды VIII Национальной конференции по искусственному интеллекту “КИИ-2002”. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. С. 519–526.

12. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: Физматлит, 2008. 712 с.
13. Павлов А.В. О возможности применения фурье-голографии в задаче моделирования творческого мышления: требования к передаточным характеристикам реверсивных голографических сред // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 10. С. 42–49.
14. Павлов А.В. Возможность реализации правдоподобных рассуждений методом голографии Фурье // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 24–33.
15. Тушканов Н.Б., Тушканова О.Н. К построению мультисенсорных систем: принципы работы неокортекса головного мозга при распознавании объектов внешнего мира // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS-IT'12. М.: Физматлит, 2012. Т. 2. С. 373–378.
16. Сергеев Г.А., Янущи Д.А. Статистические методы исследования природных объектов. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 602 с.
17. Толчельников Ю.С. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. 42 с.
18. Бекяшева З.С., Павлов А.В. Влияние высокочастотной фильтрации на характеристики случайного процесса применительно к реализации модели линейного предсказателя методом голографии Фурье // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 44–50.
19. Бекяшева З.С., Павлов А.В. Влияние фильтрации на статистические характеристики изображений при реализации модели линейного предсказателя методом голографии Фурье // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 11. С. 36–43.
20. Бекяшева З.С., Васильев В.Н., Востриков А.А., Павлов А.В. Влияние характеристик паттерна задачи на адекватность гипотез, порождаемых нейронной сетью со связями по схеме голографии Фурье // Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО. 2011. Т. 74. № 4. С. 20–25.
21. Павлов А.В. О возможности моделирования творческого мышления методом голографии Фурье // Труды XI Национальной конференции по искусственному интеллекту. М.: URSS, 2008. Т. 1. С. 384–392.
22. Кулешов А.М., Шубников Е.И., Смаева С.А. Об оптимальности голографического согласованного фильтра // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. № 6. С. 1273–1276.
23. Александрина С.А., Кулешов А.М. Влияние режекции низких пространственных частот спектра на параметры сигнала в голографическом корреляторе // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 68. № 3. С. 652–655.
24. Алексеев А.М., Павлов А.В. Об аппроксимации передаточной функции 4f схемы голографии Фурье при реализации нечетко-значимых логик // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108. № 1. С. 142–147.
25. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов, М.: Наука, 1975. 320 с.
26. Павлов А.В. Реализация модели линейного предсказателя методом фурье-голографии // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 2. С. 43–47.
27. Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф. Передача и обработка информации голографическими методами. М.: Сов. Радио, 1978. 304 с.
28. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Интуиция как самодостраивание // Вопросы философии. 1994. № 2. С. 110–128.
29. Яглом А.М. Корреляционная теория стационарных случайных функций. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
30. Гуревич С.Б., Гуревич Б.С. Возможности использования концепции оптических степеней свободы для оценки информационных свойств оптических систем // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 15–20.
31. Гуревич С.Б., Гуревич Б.С. Особенности представления информационного содержания голограмм через количество оптических степеней свободы // Письма ЖТФ. 2012. Т. 38. № 11. С. 14–19.
32. Павлов А.В. Об обусловленности характеристик понятия при его индуктивном формировании на нейросетях со связями по схеме голографии Фурье // VII Международная научно-практическая конференция “Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте”. Коломна, 16–19 мая 2011. Сборник научных трудов. М.: Физматлит, 2011. Т. 1. С. 349–359.