

Моделирование методом голографии Фурье ментальных особенностей лица, принимающего решение

А.В. Павлов¹, А.О. Гаугель¹

¹ Университет ИТМО, 197101, Россия Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, литер А,

Аннотация

Рассмотрена задача моделирования методом голографии Фурье индивидуальных ментальных особенностей лица, принимающего решение. Решение понимается как выбор из альтернатив. Задача рассмотрена для моделируемой некооперативной игрой «Дилемма заключенного» ситуации противоречия текущих условий ранее усвоенному правилу логики принятия решения. Подход основан на тезисе о коррелированности ментальных особенностей со свойствами материального носителя интеллекта, в качестве которого взята *bf*-схема голографии Фурье кольцевой архитектуры. Схема рассмотрена как трехслойная нейросеть, соответствующая нейрофизиологической концепции «кольца возбуждения» А.М. Иваницкого и порождающая логику с исключением. Дана аналитическая оценка зависимости границы нарушения классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий от радиуса корреляции эталонного образа и характеристик низкочастотных фильтров на голограммах, хранящих правила принятия решения и исключения из него. Аналитические результаты подтверждены результатами численного моделирования.

Ключевые слова: голография Фурье, голографическая регистрирующая среда, экспозиционная характеристика, фильтрация, корреляция, принятие решения, логика.

Цитирование: Павлов, А.В. Моделирование методом голографии Фурье ментальных особенностей лица, принимающего решение / А.В. Павлов, А.О. Гаугель // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 3. – С. 398-406. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1189.

Citation: Pavlov AV, Gaugel AO. Modeling mental peculiarities of a decision maker by a Fourier-holography technique. Computer Optics 2023; 47(3): 398-406. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1189.

Введение

Применение интеллектуальных информационных систем в практических задачах поставило на повестку дня проблему их интеллектуальной непрозрачности, наиболее актуальную для систем типа «черного ящика», в первую очередь – искусственных нейросетей (НС) [1, 2], включая оптические НС и нейроморфные процессоры [3–6] с голографическими элементами [7, 8]. Голография имеет ряд глубоких аналогий на уровне фундаментальных физических явлений с устройством и работой мозга как биологической НС [9, 10]: запись голограммы буквально реализует биологически мотивированное правило Хебба, трактующее обучение НС как установление синаптических весов межнейронных связей, а экспозиционные характеристики голографических регистрирующих сред (ЭХ ГРС) аналогичны чувствительности синаптических контактов. Поэтому в статье, имеющей междисциплинарный характер, рассмотрим проведем в терминах оптики, а местами дадим и их НС-аналоги.

Задача объяснения аргументации и логики принятия решения особо остро стоит в тех областях, где цена ошибки неприемлемо высока: военном деле [11–13], медицине [14–18], энергетике [19], распознавании лиц и объектов [6, 20, 21] etc. Термин «принятие решения» в статье используется в смысле выбора из альтернатив (decision making), что точно соответствует сути ситуаций с высокой ценой ошибки [10–18].

Объяснение понимается как ответ на ряд вопросов, первый из которых – почему принято такое решение? [1] Актуально его дальнейшее развитие – почему в рамках одной и той же логики, при одних и тех же условиях и аргументах разные лица, принимающие решения (ЛПР), принимают отличающиеся, порой диаметрально противоположные решения? [22] Получить ответ на этот вопрос от самой системы сложно, так как он предполагает способность к саморефлексии. Поэтому продуктивен другой путь – формализации и учета в модели ментальных особенностей ЛПР, его убеждений и предрассудков [23–27].

Один из возможных подходов к этой задаче основан на том, что модель решения имеет материальный носитель – естественную или искусственную НС, в нашем случае – голографическую схему, а физические свойства материального носителя коррелированы с ментальными особенностями ЛПР [27]. В частности, нелинейность ЭХ ГРС (синаптической чувствительности) ведет к дополнительной фильтрации записываемых на голограммах эталонных образов.

В настоящей статье дополнительная фильтрация на голограммах (матрицах синаптических весов межнейронных связей) рассмотрена как аппаратный фактор, влияющий на ментальные особенности ЛПР. Эта рабочая гипотеза исследована аналитически и подтверждена численно на традиционной для решений в условиях неопределенности и противоречий модель-

ной ситуации – некооперативной игре «Дилемма заключенного» (ДЗ). ДЗ взята, поскольку:

- ментальные особенности ЛППР наиболее критичны именно в сложных ситуациях, характеризующихся неопределенностью и противоречивостью условий;
- в ДЗ присутствуют важные для социума, в том числе для сообщества искусственных систем, вопросы нравственности, морали и кооперации [28, 29];
- на примере ДЗ показан феномен «нерациональности мышления», заключающийся в нарушении классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий [30–34].

Мы рассматриваем ментальные особенности ЛППР применительно к последнему пункту как зависимость границ этого нарушения от параметров фильтрации на голограммах, хранящих правила решения.

В качестве материального носителя взята 6f-схема голографии Фурье кольцевой архитектуры рис. 1, соответствующая модели трехслойной НС с весами связей, формируемыми в пространстве Фурье, рис. 2 [35]. Эта схема биологически мотивирована, так как:

- а) нейронные структуры коры головного мозга реализуют преобразование Фурье [36, 37];
- б) резонансная архитектура реализует концепцию «кольца возбуждения» [38, 39] – принятие решения после оценки субъективной значимости сенсорного стимула его сравнением с содержимым памяти.

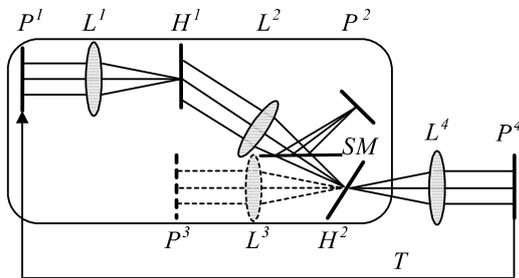


Рис. 1. 6f-схема голографии Фурье кольцевой архитектуры, соответствующая концепции «кольца возбуждения»: L^1, L^2, L^3, L^4 – Фурье-преобразующие линзы; H^1 и H^2 – голограммы, хранящие правила монотонной логики и исключения соответственно; P^1, P^2, P^3, P^4 – плоскости: входная, корреляций (логического вывода) и эталона для записи голограммы исключения H^2 соответственно; светоделиватель SM формирует две идентичные плоскости P^2 : для вывода отклика и записи голограммы исключения H^2 ; T – замыкание резонатора $P^4 \rightarrow P^1$; рамкой со скругленными углами выделена 4f-схема

Голографическая схема рис. 1 обрабатывает образы (волновые поля), которые мы рассматриваем как аналоги нейронных ансамблей, обрабатываемых НС рис. 2 – картин нейронной активности, возбуждаемых сенсорными стимулами или извлекаемых из памяти – внутренних репрезентаций оцениваемых решений.

В работе [35] показано, что схема рис. 1, рис. 2 адекватно моделирует принятие решения в ДЗ – ре-

зультаты аналитического и численного моделирования совпадают с результатами натуральных экспериментов независимых групп исследователей [30–34]. Но анализ и моделирование в [35] были проведены в приближении линейной записи голограмм (весов межнейронных связей). В настоящей статье в развитие [35] дана аналитическая модель принятия решения в противоречивой ситуации, учитывающая фильтрацию, обусловленную нелинейностью ЭХ ГРС как аналогов чувствительности синаптических контактов.

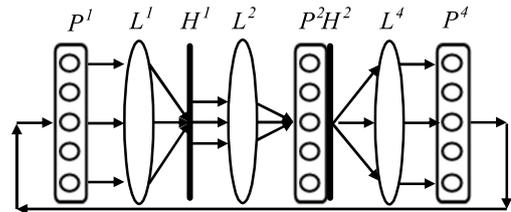


Рис. 2. Нейросетевая модель 6f-схемы голографии Фурье, связи даны условно, обозначения соответствуют рис. 1

1. Описание модельной ситуации и проблемы

Для удобства читателя сначала дадим краткое описание модельной ситуации и подхода. Читатель, заинтересованный в деталях, найдет их в работах [35] (ДЗ), [40, 41] (динамика отклика схемы в зависимости от характеристик эталонных образов и дополнительного фильтра на голограмме основного правила H^1).

ДЗ моделирует ситуацию, когда два злоумышленника А и В попались и допрашиваются по отдельности; у каждого есть две альтернативы: С (cooperate) – молчать на допросе или D (defect) – предать подельника. Повлиять на решение другого игрока ЛППР не может, а выбор он вынужден делать быстро.

Выигрыши/проигрыши зависят от ситуации:

- $C^A C^B$ – оба молчат и получают небольшие сроки;
- $C^A D^B$ – предавший В получает свободу, а молчащий А – максимальный срок;
- $D^A C^B$ – по аналогии с предыдущим;
- $D^A D^B$ (оба игрока предают друг друга) – оба получают средние между CC и CD (DC) сроки.

Парето-оптимален (максимум общей пользы) [42] вариант CC , но в жизни [30–34], как правило, система сходится к равновесию Нэша [43] DD – оба предают.

В экспериментах [30–34] оценивалась вероятность принятия ЛППР В решения «предать» при условиях:

- а) решение игрока А ему неизвестно;
- б) ему известно, что игрок А предал его (D^A);
- в) ему известно, что игрок А молчит (C^A).

Статистическая обработка результатов дала единый для всех экспериментов [30–34] порядок оценок:

$$\Pr(D^B | D^A) > \Pr(D^B | C^A) > \Pr(D^B). \quad (1)$$

Но согласно классической формуле полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий должен иметь место иной порядок:

$$\Pr(D^B | D^A) > \Pr(D^B) > \Pr(D^B | C^A). \quad (2)$$

Отличие экспериментально полученного порядка (1) от ожидавшегося (2) трактовалось как нерациональность мышления, ярко проявляющаяся в условиях неопределенности [24]. Для её объяснения был выдвинут ряд гипотез, включая старую гипотезу о квантовой природе мозга, мышления и сознания [33].

2. Подход к проблеме

Наш подход к проблеме основан на том, что:

- согласно правилу Борна [44], вероятность есть квадратичная мера, т.е. математически эквивалентна амплитуде сигнала корреляции, формируемого корреляционной в плоскости P^2 – выходной плоскости 4f-схемы голографии Фурье на рис. 1;

- в отличие от работ [30–34], фокусировавшихся на принятии решения в условиях неопределенности а), т.е. анализе поведения полной вероятности $\Pr(D^B)$, мы рассматриваем ситуацию в) – принятие решения в противоречивых условиях, т.е. исследуем поведение условной вероятности $\Pr(D^B | C^A)$. Эта смена взгляда на проблему обусловлена с позиции логики принятия решения, так как в ДЗ имеют место два типа логики:

- вероятности: а) полная $\Pr(D^B)$ и б) условная $\Pr(D^B | D^A)$ суть оценки на монотонной логике – информация о предательстве подельника (D^A) не противоречит правилу логики «молчать – невыгодно»,

- условная вероятность $\Pr(D^B | C^A)$ (ситуация в) – оценка на немонотонной логике с исключением [45], в которой информация о молчании подельника (C^A) противоречит правилу «молчать – невыгодно»; это противоречие возбуждает в схеме рис. 1, рис. 2 диссонанс, в состоянии которого и принимается решение.

3. Формирование оценки 6f-схемой голографии Фурье в режиме когнитивного диссонанса

Правило принятия решения «молчать – невыгодно» хранит голограмма H^1 . Она записывается представляющим решение «молчать» эталонным образом $C(x, y)$ с точечным опорным источником δ , т.е. описывается применительно к +1 порядку дифракции

$$H^1(v_x, v_y) = \Lambda^1(F^*(C(x, y))), \quad (3)$$

где оператор Λ^1 описывает обусловленную нелинейностью ЭХ ГРС фильтрацию на голограмме, F и астериск – символы преобразования Фурье и комплексного сопряжения, соответственно, точечный опорный источник δ здесь и далее для краткости опущен.

Решение принимается на основании оценки представленного во входной плоскости P^1 входного образа $\ln(x, y)$. Эта оценка формируется в плоскости

P^2 . На нулевой итерации, т.е. при однократном прохождении возбуждения через 4f-каскад $P^1 \rightarrow H^1 \rightarrow P^2$ строится безусловная оценка (полная вероятность), представленная функцией взаимной корреляции образов: оцениваемого $\ln(x, y)$ и записанного на голограмме $C(x, y)$

$$\begin{aligned} \text{Out}_0^{2(\ln, C)}(\zeta, \eta) &= F[F(\ln(x, y))\Lambda^1(F^*(C(x, y)))] = \\ &= [\ln(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y)], \end{aligned} \quad (4)$$

где нижний индекс при Out – номер итерации, в верхнем индексе при Out цифра указывает на плоскость измерения отклика, в скобках – сравниваемые образы, ζ, η – координаты в плоскости P^2 , \otimes – символ операции корреляции, верхний индекс Λ^1 указывает на дополнительную, вследствие нелинейности ЭХ ГРС, фильтрацию эталона $C(x, y)$ на голограмме H^1 .

В [35] со ссылкой на [46] показано, что если голограмма H^1 записана согласно (3), то $s = \pi r^2$, где r – радиус глобального максимума автокорреляционной функции (4) (ГМ АКФ), удовлетворяет определению квадратичной меры, математически строго эквивалентной вероятности [44]. Поэтому далее используем радиус ГМ АКФ как оценку, имея в виду $(r^D)^2 \equiv \Pr(D)$, $(r^{D|C})^2 \equiv \Pr(D|C)$, etc.

Условие, противоречащее правилу логики принятия решения – информация о молчании подельника, поступает в плоскость P^3 как поле $C(x, y)$ для записи с откликом 4f-схемы на образ «предать» $D(x, y)$ (4) голограммы исключения из основного правила H^2 :

$$H^2(\zeta, \eta) = \Lambda^2\left(\left(\text{Out}_0^{2(D, C)}(\zeta, \eta)\right)^* F(C(x, y))\right). \quad (5)$$

Условная оценка альтернативы «предать», представляемой в плоскости P^2 образом $D(x, y)$, строится согласно концепции «кольца возбуждения» [38, 39] на круговых итерациях и описывается выражением

$$\begin{aligned} \text{Out}_i^{2(D, C)}(\zeta, \eta) &= C^{\Lambda^2}(x, y) \times F\left(\text{Out}_{i-1}^{2(D, C)}(\zeta, \eta)\right) \otimes \\ &\otimes F\left(\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(D, C)}(\zeta, \eta)\right) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y). \end{aligned} \quad (6)$$

Упомянутое в параграфе 1 нарушение классического закона полной вероятности представим отношением безусловной (4) и условной (6) оценок

$$\Omega = \frac{\Pr(D^B)}{\Pr(D^B | C^A)} = \left(\frac{r_0^D}{r_i^{D|C}}\right)^2. \quad (7)$$

Если $\Omega > 1$, то нарушения классической теории вероятностей нет, имеет место (2). Если $\Omega < 1$, то имеет место нарушение классической теории вероятностей (1). Нас интересует зависимость Ω , точнее $-\Omega = 1$, от параметров эталонных (обучающих) образов альтернатив $D(x, y)$ и $C(x, y)$, и голограмм, хранящих основное правило (H^1) и исключение из него (условие) (H^2).

4. Модель влияния фильтрации на голограммах на оценку альтернатив

Для сокращения выкладок далее, где это возможно без ущерба адекватности модели, используем нотации для функций только одного аргумента. Примем модель экспоненциальных спектров амплитуд образов: эталона $C(x)$ (образа «молчать»)

$$S^{CRef}(v) = \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^{CRef}}\right)^d\right), \quad (8)$$

и входного (оцениваемого образа «предать») $D(x)$:

$$S^{DRef}(v) = \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^{DRef}}\right)^d\right), \quad (9)$$

где v – пространственная частота, v_{α} с верхним индексом, указывающим на образ – параметр модели, частота, измеряемая по уровню α , определяемому как отношение значения спектра на данной частоте v_{α} к её значению на нулевой частоте, d – показатель степени. При $\alpha = 0,606$ и $d = 2$ имеем Гауссовы спектры.

Для реальной информации характерны степенные спектры амплитуд, отличающиеся от экспоненциальных большим удельным весом высоких частот. В [47] показано, что с учетом ограниченности динамического диапазона сенсоров, трактов ввода и ЭХ ГРС, для аппроксимации передаточной характеристики схемы, т.е. записанных на голограмме спектров амплитуд, на практике применима экспоненциальная модель (8).

Введем отношение параметров спектров амплитуд образов, представляющих оцениваемые альтернативы

$$V = \frac{v_{\alpha}^{CRef}}{v_{\alpha}^{DRef}}, \quad (10)$$

и представим (9) в виде:

$$S^{DRef}(v) = \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v \cdot V}{v_{\alpha}^{CRef}}\right)^d\right). \quad (11)$$

Для обусловленного нелинейностью ЭХ ГРС низкочастотного фильтра (НЧФ) на голограммах примем экспоненциальную модель (8), т.е.

$$\Phi^l(v) = \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^l}\right)^d\right), \quad (12)$$

для голограммы H^1 и аналогично для голограммы H^2 . Высокочастотную фильтрацию на голограммах, ведущую, как показано в [36, 37], к изменению типа динамики схемы и тем самым к получению неадекватной оценки, оставим за скобками настоящего анализа.

Значение (10), соответствующее $\Omega = 1$, определяет стабильный отклик голографической схемы (и НС):

$$\forall i \in [0, \infty]: \text{Out}_0^{2(D,C)}(\zeta) = \text{Out}_i^{2(D,C)}(\zeta), \quad (13)$$

обозначим его V^{St} и найдем его связь с параметрами спектров эталонов и голограмм из условия (13).

С учетом (4) для левой части (13) и (6) для правой, переведем рассмотрение в пространство Фурье и опустив ряд элементарных преобразований, получим

$$\frac{F(D^{ln}(x))}{F(C^{\Lambda^2}(x))} = \text{Out}_{i-1}^{2(D,C)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{2(D,C)}(\zeta))^*. \quad (14)$$

Левая часть (14) может быть преобразована к виду

$$\begin{aligned} \frac{F(D^{ln}(x))}{F(C^{\Lambda^2}(x))} &= \\ &= \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^{CRef}}\right)^d \left[(V^{St})^d - 1 - (R_{\alpha}^2)^d \right]\right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $R_{\alpha}^2 = v_{\alpha}^{CRef} / v_{\alpha}^2$ – оценка НЧФ в плоскости голограммы H^2 , обратная относительно спектра записанного образа $C(x)$, а масштабы преобразований Фурье, т.е. фокусные расстояния линз L^2 и L^3 , приняты равными.

Поскольку спектры фаз образов $C(x)$ и $D(x)$ идентичны, то правую часть (14), опустив несложные преобразования, представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Out}_{i-1}^{2(D,C)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{2(D,C)}(\zeta))^* &= (\text{Out}_0^{2(D,C)}(\zeta))^2 = \\ &= \left\{ F \left[\exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^{CRef}}\right)^d \left(1 + (V^{St})^d + (R_{\alpha}^1)^d\right)\right) \right] \right\}^2, \end{aligned} \quad (16)$$

где $R_{\alpha}^1 = v_{\alpha}^{CRef} / v_{\alpha}^1$ – оценка НЧФ в плоскости голограммы основного правила Н1, также обратная относительно спектра эталона $C(x)$. Введем новый параметр

$$v_{\alpha}^{St} = \frac{v_{\alpha}^{CRef}}{\sqrt[d]{1 + (V^{St})^d + (R_{\alpha}^1)^d}}$$

и перепишем (16):

$$\begin{aligned} \text{Out}_{i-1}^{2(D,C)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{2(D,C)}(\eta))^* &= \\ &= \left\{ F \left[\exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{v}{v_{\alpha}^{St}}\right)^d\right) \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда, опираясь на результаты, представленные в работе [47], аппроксимируем (17) выражением

$$\text{Out}_{i-1}^{2(D,C)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{2(D,C)}(\eta))^* = \exp\left(-2\ln(\alpha)\left(\frac{\zeta}{\zeta_{\alpha}}\right)^{dc}\right), \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \zeta_{\alpha} &= \frac{kp(d)}{2\pi v_{\alpha}^{St}} = \frac{1}{2\pi v_{\alpha}^{CRef}} \cdot kp(d) \sqrt[d]{1 + (V^{St})^d + (R_{\alpha}^1)^d}, \\ dc &= d \cdot kd(d), \end{aligned}$$

а $kp(d)$ и $kd(d)$ – определяемые численно функциональные коэффициенты аппроксимации (18) [47].

Из равенства (15) и (18), как правой и левой частей (14), посредством ряда несложных преобразований можно получить выражение для интересующей нас оценки V^{St} , соответствующего условию $\Omega = 1$.

В общем случае это выражение отличается изрядной

громоздкостью и неудобно для анализа, поэтому здесь его не приводим, но с вычислительной точки зрения численное решение (18) относительно V^{St} проблемы не представляет. Выражение для оценки V^{St} приобретает достаточно компактный и удобный для анализа вид при целых показателях степени d . Например, для Гауссовых спектров амплитуд, т.е. при значениях $\alpha = 0,606$ и $d = 2$, имеем:

$$V^{St} = \frac{v_{0,606}^{CRef}}{v_{0,606}^{DRef}} = \sqrt{\sqrt{2\left(2\pi\frac{\zeta}{v}\right)^2 (v_{0,606}^{CRef})^4 + [Q+1]^2 + (R^2)^2 [(R^1)^2 + 2]} - Q}, \tag{19}$$

где $Q = \frac{(R^1)^2 - (R^2)^2}{2}$.

Условие стабильности отклика может быть выражено и через радиусы ГМ АКФ эталонных образов. Для Гауссовых спектров $r^{Ref} = \sqrt{2} / 2\pi v^{Ref}$, откуда

$$V^{St} = \frac{v_{0,606}^{CRef}}{v_{0,606}^{DRef}} = \frac{r^{DRef}}{r^{CRef}} = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\zeta}{2\pi v}\right)^2 \frac{2}{(r^{CRef})^4} + [Q+1]^2 + (R^2)^2 [(R^1)^2 + 2]} - Q}. \tag{20}$$

Выражения (19) и (20) включают в себя частный случай линейных ЭХ ГРС, исследованный в [35].

Из анализа выражений (19) и (20) видно, что член Q описывает противоположный эффект фильтрации на голограммах основного правила H^1 (1) и исключения H^2 (5): низкочастотная фильтрация на голограмме основного правила ведет к снижению значения V^{St} , а на голограмме исключения H^2 – к росту. Эта разнонаправленность отражает немонотонность порождаемой *bf*-схемой рис. 1 логики с исключением, адекватной принятию решения в противоречивых условиях.

5. Численное моделирование

5.1. Условия моделирования и результаты

Моделировалась работа показанной на рис. 1 *bf*-схемы голографии Фурье (НС рис. 2) при реализации сценария «ДЗ». Образы оцениваемых альтернатив «молчать» $C(x)$ и «предать» $D(x)$ моделировались реализациями стационарного случайного процесса с Гауссовым спектром амплитуд и случайным, нормально распределенным с дисперсией 2π спектром фаз. Все образы имели один спектр фаз и отличались только спектрами амплитуд. Спектры амплитуд образов имели размер области определения 2048 отсчетов.

В соответствии с условиями «ДЗ» рассмотрены оценки, формируемые в корреляционной плоскости на первых итерациях. Исследовалась зависимость радиусов откликов (ГМ АКФ), измеряемых в плоскости P^2 – условной $r^{D|C}$ и безусловной r^D оценок, от меры различения альтернатив V (10) ЛПР для ряда вариантов НЧФ (12) на голограммах основного правила H^1 и исключения H^2 , которые без учета фильтров моделировались согласно (3) и (5) как линейные.

На рис. 3 дан пример зависимости радиуса отклика r от меры различения альтернатив V (10) при отсутствии фильтрации на голограммах (при линейных

ЭХ ГРС) для значения параметра спектра эталонного образа «молчать» $v_{0,606}^{CRef} = 300$ отсчетов, что соответствует радиусу ГМ АКФ $r^{CRef} = 3,073$ отсчета.

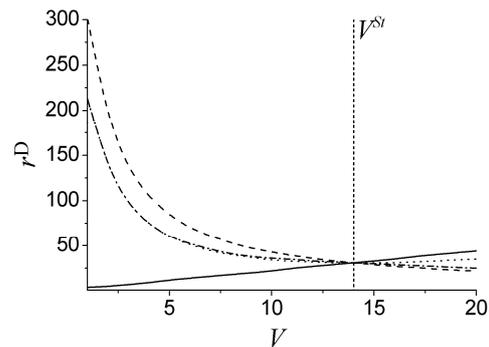


Рис. 3. Зависимости оценок варианта «предать» от меры их различения V : сплошная линия – безусловная оценка r^D ; C_i , штриховая, пунктирная и штрихпунктирная – условные оценки $r^{D|C}$ на первой, второй и третьей кольцевых итерациях соответственно; вертикальной штриховой линией отмечено значение V^{St}

Значение $V^{St} = 13,97$, даваемое формулами (19), (20), точно соответствует представленному на рис. 3 полученному экспериментально.

Значение V^{St} , как следует из (19) и (20), зависит от значений параметров спектра записанного на голограммах эталонного образа и фильтров, обусловленных ограниченностью ЭХ ГРС. Для иллюстрации на рис. 4 даны примеры динамики редуцирования когнитивного диссонанса – зависимости радиуса отклика в корреляционной плоскости P^2 от номера итерации i . Значение параметра записанного на голограммах эталонного образа «молчать» $C(x)$ $v_{0,606}^{CRef} = 300$, как и на рис. 3. Зависимости даны для трех значений параметра оцениваемого образа «предать» $D(x)$, дающих стабильный отклик при фильтрах, обозначенных ниже соответствующими прописными буквами:

- А) $v^{D In} = 21,43, r^{CFiltr} = r^{CRef} = 3,073, V^{St} = 14;$
- Б) $v^{D In} = 25, r^{CFiltr} = 24, V^{St} = 12;$
- В) $v^{D In} = 20, V^{St} = 15;$

и трех вариантов фильтрации на голограммах:

- а) без фильтрации (линейные голограммы);
- б) НЧФ на голограмме основного правила H^1 ($R^1 = 11$) при линейной голограмме исключения H^2 ;
- в) НЧФ на обеих голограммах: основного правила H^1 и исключения H^2 ($R^1 = R^2 = 11$).

Комбинации значений параметров образов и НЧФ А.а, Б.б и В.в согласно $v^{D In} = v^{C Ref} / V^{St}$ должны давать стабильный отклик, при несовпадении литер должен возникать диссонанс, что и видим на рис. 4: А.б и А.в.

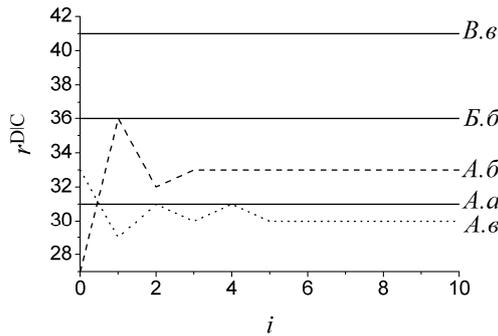


Рис. 4. Динамика редуцирования когнитивного диссонанса в зависимости от фильтрации на голограммах основного правила H^1 и исключения H^2 , i – номер итерации

Таким образом, кривые А.а, Б.б и В.в на рис. 4 подтверждают корректность теоретической оценки (19), (20) условия стабильности отклика в корреляционной плоскости V^{St} , оно же – граница нарушения классической формулы полной вероятности при дизъюнкции несовместных событий. При $V < V^{St}$ имеем нарушение классической формулы ($\Omega < 1$), а при $V > V^{St}$ её выполнение – безусловная оценка (полная вероятность) r^D выше условной $r^{D|C}$, т.е. $\Omega > 1$.

Из (19), (20) следует, что V^{St} (граница нарушения классической формулы полной вероятности) зависит от параметров как спектров записанных на голограммах эталонных образов, так и НЧФ, возникающей на голограммах вследствие нелинейности ЭХ ГРС. Для наглядности на рис. 5а и б приведены зависимости V^{St} от радиуса ГМ АКФ эталонного образа «молчать» $S(x)$ при фильтрациях на голограммах основного правила H^1 (рис. 5а) и исключения H^2 (рис. 5б).

5.2. Обсуждение

Из анализа рис. 5а и б можно сделать вывод о влиянии фильтрации на голограммах основного правила и исключения, как голографической реализации индивидуальной «аппаратной» особенности ЛПР, на его оценку входного образа, в рассмотренном случае – образа альтернативы «предать», в том числе в контексте «нерациональности» мышления как нарушения классической формулы полной вероятности.

Сравнение рис. 5а и б подтверждает антитонность низкочастотных фильтраций на голограммах основ-

ного правила H^1 и исключения H^2 , описываемую членом Q в (19) и (20): усиление НЧФ на голограмме основного правила H^1 (рис. 5а) ведет к смещению границы нарушения классической формулы полной вероятности в сторону меньших значений V^{St} (влево на рис. 3), а усиление НЧФ на голограмме исключения H^2 – наоборот, к смещению этой границы в сторону больших значения V^{St} , т.е. вправо на рис. 3.

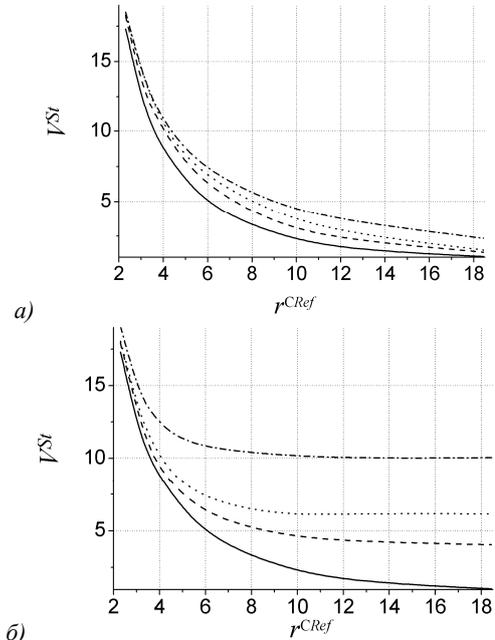


Рис. 5. Зависимости V^{St} от радиуса АКФ эталонного образа, записанного на голограмме основного правила: для низкочастотных фильтров на голограмме H^1 : штрихпунктирная линия $R^1 = 0$ (без фильтра), пунктирная – $R^1 = 4$, штриховая – $R^1 = 6$, сплошная – $R^1 = 10$ (а), для низкочастотных фильтров на голограмме H^2 при параметре НЧФ на голограмме H^1 : $R^1 = 10$ сплошная линия $R^2 = 0$ (без фильтра), штриховая – $R^2 = 4$, пунктирная – $R^2 = 6$, штрихпунктирная – $R^2 = 10$ (б)

Это обусловлено тем, что низкочастотная фильтрация на голограмме основного правила H^1 ведет к увеличению радиуса корреляции записанного на голограмме образа, сравнительно с эталонным, чей радиус корреляции отложен на рис. 5 по оси абсцисс. Соответственно, с ростом оценки НЧФ (ослаблением высоких пространственных частот) зависимости V^{St} от радиуса ГМ АКФ эталона опускаются вниз.

Формируемый в плоскости P^2 радиус ГМ АКФ при записи голограммы исключения H^2 согласно (5) играет роль пространственно-модулированного опорного пучка, задающего форм-фактор голограммы [48]. Поскольку плоскость P^2 как плоскость записи голограммы H^2 связана с плоскостью голограммы H^1 преобразованием Фурье, то НЧФ в плоскости голограммы H^1 преобразуется в последней в высокочастотную фильтрацию. Таким образом, в плоскости голограммы H^2 имеем конкуренцию двух фильтраций: высокочастотной, как Фурье-образа НЧФ на голограмме H^1 , и низкочастотной на голограмме H^2 .

Эта антитонность НЧФ на голограммах может быть наглядно показана аналитически. Опустив несложные выкладки, представим параметр функции Гаусса, описывающей при оговоренных выше условиях моделирования функцию голограммы H^2 для +1 порядка дифракции в виде

$$\zeta^{H^2} = \frac{1}{2\pi v^{CRef}} \times \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{1+(R^1)^2+(V)^2} + \frac{1+(R^2)^2}{(2\pi v^{CRef})^2 (v^{2CRef})^2}}}, \quad (21)$$

где для большей ясности отдельно выделен v^{2CRef} – параметр спектра амплитуд эталона $C(x)$ «молчать», предъявляемого в плоскости P^3 для записи голограммы H^2 . В (21) антитонность фильтраций представлена очень наглядно: если параметр R^1 входит в знаменатель первого слагаемого в знаменателе подкорневого выражения, то R^2 – в числитель второго.

Поле, восстанавливаемое голограммой H^2 при её освещении откликом голограммы H^1 , в плоскости P^2 сразу за ней (голограммой H^2) есть Фурье-образ поля, вновь поступающего во входную плоскость схемы рис. 1. Параметр модуля этого поля, т.е. спектра амплитуд поля во входной плоскости схемы P^1 , также удобно представить в аналогичном (21) виде:

$$\zeta^{H^2Out} = \frac{1}{2\pi v^{CRef}} \times \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{1+(R^1)^2+(V)^2} + \frac{1+(R^2)^2}{(2\pi v^{CRef})^2 (v^{2CRef})^2}}}, \quad (22)$$

Обратим внимание, что при сравнении рис. 5а и б заметна «несимметричность» эффекта НЧФ на голограммах – фильтрация на голограмме исключения H^2 более эффективна, чем на голограмме основного правила H^1 . Этот феномен следует из (21) и (22). Более наглядно он может быть показан при анализе выражений (19) и (20): «абсолютную» антитонность как взаимную компенсацию фильтраций описывает член

$$Q = \frac{(R^1)^2 - (R^2)^2}{2},$$

и при $R^1 = R^2$ выражение (20) (и аналогично (19)) принимает вид

$$V^{St} = \sqrt[4]{\left(\frac{\zeta}{2\pi v}\right)^2 \frac{2}{(v^{CRef})^4} + (R^2)^2 [(R^1)^2 + 2]} + 1.$$

Здесь, т.е. при равенстве нулю описывающего антитонность члена Q , остается только изотонный компонент фильтрации на обеих голограммах $(R^2)^2 [(R^1)^2 + 2]$, результат чего и видим на рис. 5,

сравнивая кривые для $R^1 = R^2$: сплошную на рис. 5а с штрихпунктирной на рис. 5б.

Заключение

Представленные результаты показывают расширение возможностей голографических информационных технологий в плане перехода от реализации обезличенных моделей к моделированию индивидуальных ментальных особенностей как атрибута человека, актуального в первую очередь при принятии решения в сложных: противоречивых и неопределенных условиях. Здесь работает такой, всегда присутствующий в реальных системах, физический фактор, как нелинейность экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред – аналог нелинейности синаптической чувствительности, присущей биологическим нейросетям. Эта нелинейность порождает дополнительную фильтрацию на голограммах – оптических аналогах нейросетевых матриц весов межнейронных связей.

Фильтрация на голограммах изменяет радиус корреляции записанных на голограммах образов относительно эталонных (обучающих НС). Применительно к рассмотренной 6f-схеме голографии Фурье кольцевой архитектуры это образы основного правила логики принятия решения (3) и исключения из него (5). Как видно из (19) и (20), отношение параметров спектров амплитуд эталонного и оцениваемого (входного) образов V^{St} , соответствующее стабильному отклику голографической схемы и определяющее границу нарушения классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий, с ростом радиуса корреляции, обусловленным усилением низкочастотной фильтрации, уменьшается.

Эта сугубо физическая зависимость может быть соотнесена с такой индивидуальной когнитивной характеристикой лица, принимающего решение, как общность взгляда на мир vs фокусировка на деталях. Голограммы хранят внутреннюю картину мира субъекта, а радиус корреляции отражает её внутреннюю связность – важнейший атрибут информации, отличающий её от белого шума. Если радиус корреляции мал, то во внутренней картине мира связаны только ближайшие элементы – субъект решения сфокусирован на частностях в ущерб общему, «за деревьями леса не видит». Как результат, для него характерна высокая оценка альтернативы «предать» и широкий диапазон нарушения формулы полной вероятности. Рост радиуса корреляции отражает возникновение дальних связей во внутренней картине мира, представление в ней более общих закономерностей мироустройства. Снижение оценки решения предать, соответствующее сужению диапазона нарушения классической формулы полной вероятности, связано с формированием более общего взгляда на мир – лицо, принимающее решение, начинает, образно говоря, «видеть дальше собственного носа».

Таким образом, данные результаты, полученные при исследовании голографической схемы, имеют значение для нескольких областей: как собственно оптики, так и когнитивной науки, включая искусственный интеллект и теории вероятностей.

References

- [1] Samek W, Montavon G, Lapuschkin S, Anders CJ, Müller K-R. Explaining deep neural networks and beyond: a review of methods and applications. *Proc IEEE* 2021; 109(3): 247-278. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3060483.
- [2] Gunning D, Aha DW. DARPA's explainable artificial intelligence program. *AI Magazine* 2019; 40(2): 44-58. DOI: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
- [3] Zhou T, Lin X, Wu J, et al. Large-scale neuromorphic optoelectronic computing with a reconfigurable diffractive processing unit. *Nat Photonics* 2021; 15: 367-373. DOI: 10.1038/s41566-021-00796-w.
- [4] Brunner D, Psaltis D. Competitive photonics neural networks. *Nat Photonics* 2021; 15: 323-324. DOI: 10.1038/s41566-021-00803-0.
- [5] Cavaillès A, Boucher P, Daudet L, Carron I, Gigan S, Müller K. High-fidelity and large-scale reconfigurable photonic processor for NISQ applications. *Opt Express* 2022; 30(17): 30058-30065. DOI: 10.1364/OE.462071.
- [6] Yang Y, Zhou P, Chen T, Huang Y, Li N. Optical neuromorphic computing based on a large-scale laterally coupled laser array. *Opt Commun* 2022; 521: 128599. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128599.
- [7] Kanjana G, Sheeja MK. Secure storage and matching of latent fingerprints using phase shifting digital holography. *Pattern Recognit Lett* 2022; 153: 113-117. DOI: 10.1016/j.patrec.2021.10.017.
- [8] Wang W, Wang X, Xu B, Chen J. Optical image encryption and authentication using phase-only computer-generated hologram. *Opt Lasers Eng* 2021; 146: 106722. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106722.
- [9] Pribram K. Languages of the brain; experimental paradoxes and principles in neuropsychology. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1971. ISBN: 978-0-13-522730-5.
- [10] Sudakov KV. Holographic construction of integrative cerebration. *Biol Bull Russ Acad Sci* 2012; 39(1): 51-59. DOI: 10.1134/S1062359012010098.
- [11] Gavrillov DA. Investigation of the applicability of the convolutional neural network U-Net to a problem of segmentation of aircraft images. *Computer Optics* 2021; 45(4): 575-579. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-804.
- [12] Goncharov DS, Petrova EK, Ponomarev NM, Starikov RS, Zlokazov EYu. Implementation features of invariant optical correlator based on amplitude LC SLM. *Optical Memory and Neural Networks* 2020; 29(2): 110-117. DOI: 10.3103/S1060992X20020022.
- [13] Goncharov DS, Petrova EK, Ponomarev NM, Rodin VG, Starikov RS, Trocenko NA, Fazliev TS. Features of the invariant correlation filter application for recognition of color subpixel images. *Radiophys Quant El+* 2021; 63(8): 605-611. DOI: 10.1007/s11141-021-10083-x.
- [14] Meldo A, Utkin L, Kovalev M, Kasimov E. The natural language explanation algorithms for the lung cancer computer-aided diagnosis system. *Artif Intell Med* 2020; 108(8): 101952. DOI: 10.1016/j.artmed.2020.101952.
- [15] Lyakhov PA, Lyakhova UA. Neural network classification system for pigmented skin neoplasms with preliminary hair removal in photographs. *Computer Optics* 2021; 45(5): 728-735. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-863.
- [16] Sludnova AA, Shutko VV, Gaidel AV, Zelter PM, Kapishnikov AV, Nikonorov AV. Identification of pathological changes in the lungs using an analysis of radiological reports and tomographic images. *Computer Optics* 2021; 45(2): 261-266. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-793.
- [17] Thanh DNH, Hai NH, Hieu LM, Tiwari P, Prasath VBS. Skin lesion segmentation method for dermoscopic images with convolutional neural networks and semantic segmentation. *Computer Optics* 2021; 45(1): 122-129. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-748.
- [18] Fida AD, Gaidel AV, Demin NS, Ilyasov NY, Zamytskiy EA. Automated combination of optical coherence tomography images and fundus images. *Computer Optics* 2021; 45(5): 721-727. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-892.
- [19] Amiri SS, Mottahedi S, Lee ER, Hoque S. Peeking inside the black-box: Explainable machine learning applied to household transportation energy consumption. *Comput Environ Urban Syst* 2021; 88: 101647. DOI: 10.1016/j.compenvurbysys.2021.101647.
- [20] Rodiah, Madenda S, Susetianingtiyas DT, Fitrianiingsih, Adlina D, Arianty R. Retinal biometric identification using convolutional neural network. *Computer Optics* 2021; 45(6): 865-872. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-890.
- [21] Ganeeva YK, Myasnikov EV. Identifying persons from iris images using neural networks for image segmentation and feature extraction. *Computer Optics* 2022; 46(2): 308-316. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1023.
- [22] Conati C, Barra O, Putnam V, Rieger L. Toward personalized XAI: A case study in intelligent tutoring systems. *Artif Intell* 2021; 298: 103503. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103503.
- [23] Strimping P, Vartanova I, Jansson F, Eriksson K. The connection between moral positions and moral arguments drives opinion change. *Nat Hum Behav* 2019; 3: 922-930. DOI: 10.1038/s41562-019-0647-x.
- [24] Dazeley R, Vamplew P, Foale C, Young C, Aryala S, Cruz F. Levels of explainable artificial intelligence for human-aligned conversational explanations. *Artif Intell* 2021; 299: 103525. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103525.
- [25] Kliegr T, Bahník Š, Fürnkranz J. A review of possible effects of cognitive biases on interpretation of rule-based machine learning models. *Artif Intell* 2021; 295: 103458. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103458.
- [26] Tversky A, Kahneman D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science. New Series* 1974; 185(4157): 1124-1131.
- [27] Korteling JE, Brouwer A-M, Toet A. A neural network framework for cognitive bias. *Front Psychol* 2018; 9: 1561. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01561.
- [28] Yamamoto H, Okada I, Taguchi T, Muto M. Effect of voluntary participation on an alternating and a simultaneous prisoner's dilemma. *Phys Rev E* 2019; 100: 032004. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.032004.
- [29] Menshikov IS, Shklover AS, Babkina TS, Myagkov MG. From rationality to cooperativeness: The totally mixed Nash equilibrium in Markov strategies in the iterated Prisoner's Dilemma. *PLoS ONE* 2017; 12(11): e0180754. DOI: 10.1371/journal.pone.0180754.
- [30] Tversky A, Shafir E. The disjunction effect in choice under uncertainty. *Psychol Sci* 1992; 3(5): 305-309. DOI: 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00678.x
- [31] Crosson R. The disjunction effect and reason-based choice in games. *Organ Behav Hum Decis Process* 1999; 80: 118-133. DOI: 10.1006/obhd.1999.2846
- [32] Li S, Taplin J. Examining whether there is a disjunction effect in Prisoner's Dilemma games. *China Journal of Psychology* 2002; 44: 25-46.

- [33] Busemeyer JR, Matthew M, Wang ZA. Quantum game theory explanation of disjunction effects. Proc 28th Annual Conf of the Cognition Science Society 2006: 131-135.
- [34] Hristova E, Grinberg M. Disjunction effect in prisoner's dilemma: evidences from an eye-tracking study. Proc 30th Annual Conf of the Cognition Science Society 2008: 1225-1230.
- [35] Pavlov AV. Modeling of quantum-like cognitive phenomena by the Fourier-holography technique under the choice of alternatives. Computer Optics 2021; 45(4): 551-561. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-830.
- [36] Glezer VD. The role of spatial-Frequency analysis, primitives, and interhemispheric asymmetry in the identification of visual images. Hum Physiol 2000; 26(5): 636-640. DOI: 10.1007/BF02760381.
- [37] Glezer VD. Matched filtering in the visual system. J Opt Technol 1999; 66(10): 853-856. DOI: 10.1364/JOT.66.000853.
- [38] Ivanitskii AM. Information synthesis in key parts of the cerebral cortex as the basis of subjective. Neurosci Behav Physiol 1997; 27: 414-426. DOI: 10.1007/BF02462943.
- [39] Ivanitsky AM, Ivanitsky GA, Sysoeva OV. Brain science: On the way to solving the problem of consciousness. Int J Psychophysiol 2009; 73: 101-108. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2009.02.004.
- [40] Pavlov AV. Holographic memory updated by contradicted information: influence of low frequency attenuation on response stability. Computer Optics 2020; 44(5): 728-736. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.
- [41] Pavlov AV. The influence of hologram recording conditions and nonlinearity of recording media on the dynamic characteristics of the Fourier holography scheme with resonance architecture. Opt Spectrosc 2015; 119(1): 146-154. DOI: 10.1134/S0030400X1507022X.
- [42] Nogin VD. Decision-making in a multi-criteria environment: a quantitative approach [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2002.
- [43] Nash JF Non-cooperative games. Ann Math 1951; 54(2): 286-295. DOI: 10.2307/1969529.
- [44] Feinman RF, Leighton RB, Sands M. The Feinman lectures on physics. Vol 3. London: Addison-Wesley Publishing Company Inc; 1965.
- [45] Reiter R. A logic for default reasoning. Artif Intell 1980; 13(1-2): 81-132.
- [46] Shubnikov EI. Signal to noise ratio under correlation comparison of images. Opt Spectrosc 1987; 62(2): 268-272.
- [47] Pavlov AV, Gaugel AO, Alekseev AM. On the approximation of transfer characteristic and correlation response of the Fourier-holography scheme. Opt Spectrosc 2022; 130(9): 1389-1396. DOI: 10.21883/OS.2022.09.53300.3478-22.
- [48] Shoidin SA, Kovalev MS. Spatial photoresponse, formfactor, and requirements to holographic materials. Opt Spectrosc 2020; 128(7): 885-896. DOI: 10.1134/S0030400X20070206.

Сведения об авторах

Павлов Александр Владимирович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент факультета фотоники и оптоинформатики Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). В 1980 году окончил инженерно-физический факультет Ленинградского института точной механики и оптики, в 1996 году защитил кандидатскую диссертацию в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова, в 2014 году защитил докторскую диссертацию в университете ИТМО. Область научных интересов: голография, оптические информационные технологии, распознавание образов, искусственный интеллект. Публикации: 200 научных трудов, 12 авторских свидетельств. ORCID: 0000-0001-6706-6619. E-mail: avpavlov@itmo.ru.

Гаугель Артур Олегович, аспирант университета ИТМО. В 2019 г. окончил бакалавриат, а в 2021 году – магистратур БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова по специальности «Лазерная техника и технологии». Область научных интересов: голография, оптические информационные технологии, распознавание образов, искусственный интеллект. E-mail: gaugetartur@yandex.ru.

ГРНТИ: 28.23.15, 28.23.24, 29.31.33

Поступила в редакцию 11 июля 2022 г. Окончательный вариант – 24 ноября 2022 г.

Modeling mental peculiarities of a decision maker by a Fourier-holography technique

A.V. Pavlov¹, A.O. Gaugel¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia, Kronverkskii av. 49

Abstract

A task of modeling individual mental features of a decision-maker using a Fourier holography setup is considered. The problem is considered for a situation when current conditions of decision-making contradict to the previously learned rule of decision-making logic modeled by the non-cooperative game "Prisoner's Dilemma". The approach to the problem is based on a hypothesis of the correlation between mental features and the properties of the neural network as a material carrier of intelligence. The 6f Fourier holography scheme of the resonant architecture is considered as a three-layer neural network implementing a neuro-physiologically motivated concept of the "excitation ring" proposed by A.M. Ivanitsky. We analytically assess the dependence of the validity limits of the classical total probability formula for a disjunction of incompatible events on the characteristics of low-frequency filters in holograms and the correlation radii of the training image of the basic decision rule. Analytical results are confirmed by results of the numerical simulation.

Keywords: Fourier holography, holographic recording medium, exposure characteristics filtration, correlation, decision making, non-cooperative games, Prisoner's dilemma, logic with exclusion, cognitive dissonance, mental peculiarities.

Citation: Pavlov AV, Gaugel AO. Modeling mental peculiarities of a decision maker by a Fourier-holography technique. *Computer Optics* 2023; 47(3): 398-406. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1189.

Authors' information

Alexander V. Pavlov, born in 1957, Doctor Science in Physics and Mathematics, senior researcher, docent Photonics and Optoinformatics department of ITMO University (Saint-Petersburg). In 1980 he was graduated from the Leningrad Institute for Fine Mechanics and Optics, in 1996 he received Ph.D degree in S.I.Vavilov State Optical Institute, in 2014 – Dr. Sc. Degree in ITMO University. Area of interests: holography, optical information technologies, pattern recognition, artificial intelligence. Has 200 scientific publications, 12 patents. ORCID: 0000-0001-6706-6619. E-mail: avpavlov@itmo.ru.

Artur O. Gaugel, PhD student of ITMO University. He has received BSc in 2019 and MSc in 2021 from BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov. E-mail: gauigelartur@yandex.ru.

Received July 11, 2022. The final version – November 24, 2022.
