

Моделирование квантово-подобных когнитивных феноменов методом голографии Фурье: задача выбора альтернатив

А.В. Павлов¹

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

Аннотация

Статья посвящена поиску биологически мотивированного механизма когнитивного феномена нарушения классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий, относимого рядом исследователей к категории квантово-подобных. Показан классический механизм, не требующий обращения к квантовой механике ни по физической сути, ни на уровне формализма и реализуемый $6f$ -схемой голографии Фурье резонансной архитектуры. Рассмотрение проведено в рамках задачи принятия решения как оценки альтернатив на примере некооперативной игры «Дилемма заключенного». Подход к проблеме основан на поиске механизма формирования условной оценки при условии, противоречащем правилу монотонной логики принятия решения. Показано, что эта оценка, в отличие от безусловной и условной при непротиворечащем условию, формируется логикой с исключением. Кольцевая архитектура голографической схемы соответствует биологически обоснованной нейросетевой концепции кольца возбуждения и реализует когнитивный диссонанс на логике с исключением. Аналитически определены условия и границы диапазона нарушения классической формулы полной вероятности в зависимости от радиуса корреляции эталонного образа, записанного на голограмме, хранящей правило вывода монотонной логики. Аналитическая модель подтверждена количественным совпадением результатов численного моделирования с опубликованными результатами натуральных экспериментов.

Ключевые слова: голография Фурье, принятие решения, выбор альтернатив, квадратичная мера, оценка, квантовая вероятность, некооперативные игры, логика с исключением, когнитивный диссонанс, динамическая система, радиус корреляции, параметр порядка.

Цитирование: Павлов, А.В. Моделирование квантово-подобных когнитивных феноменов методом голографии Фурье: задача выбора альтернатив / А.В. Павлов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 551-561. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-830.

Citation: 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.

Введение

Усложнение актуальных задач обработки информации стимулирует обращение к таким направлениям, как квантовые [1, 2], квантово-подобные [3] и биологически мотивированные модели. Среди последних особый интерес вызывают методы решения вычислительно-затратных задач, в той или иной степени подобные исполняемым человеком [4, 5]. Это направление сегодня развивается преимущественно в рамках концепции свёрточных нейросетей, позволяющих эффективно решать ряд практических задач: распознавания [6–9], анализа и обработки изображений [8–12], взаимодействия независимых агентов [13], контроля и безопасности [14–16].

Такие модели актуальны не столько в плане возможного вычислительного, т.е. количественного выигрыша, но прежде всего потому, что попытки решения в рамках традиционной компьютерной метафоры ряда трудноформализуемых задач, успешно решаемых человеком, либо безуспешны, либо ведут к комбинаторному взрыву, для их решения искусственными интеллектуальными системами нужна не просто вычислительная мощность, но иная парадигма.

В этом контексте следует упомянуть исследования А. Тверски и Д. Канемана [17–23], показавшие формальную нерациональность принимаемых человеком решений: нарушение законов классической логики для конъюнкции [22] и нарушение классической формулы полной вероятности при дизъюнкции несовместных событий (альтернатив) [23].

Эти результаты, подтвержденные экспериментами других исследователей [24–27], инициировали поиск адекватных моделей рассуждений и, в частности, новый всплеск внимания к старой гипотезе о квантовой природе мозга [28], мышления [3] и сознания [29]. Так, в статье [30] предложена квантово-логическая модель конъюнкции, в [26, 31–33] – квантово-вероятностная модель дизъюнкции. Но самих квантовых явлений или механизмов в этих, как и других [3, 28, 34, 35] работах, не показано, гипотеза о квантовой природе мышления базируется на аналогиях формально-математического уровня абстракции [28, 36].

Вместе с тем эта гипотеза привлекает физическим объяснением «вычислительной мощности» мозга и перспективами объединения квантовых и бионических методов в интеллектуальных информационных

системах. Но для ответа на вопрос о её адекватности реальности необходим анализ физических механизмов, порождающих квантово-подобные феномены при обработке информации нейросетью.

Такой анализ применительно к нарушению закона классической вероятности конъюнкции независимых событий дан в [37–39]. Показано, что в нейросетях со связями в пространстве Фурье феномен порождается вполне классическими механизмами, обусловленными нелинейностью как экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред [37], так и чувствительности сенсоров, регистрирующих отклик нейросети [38, 39]. Эти физические механизмы соответствуют механизмам биологическим: нелинейности записи весов межнейронных связей и утомляемости синаптической передачи [40] соответственно.

В развитие [37–39], в настоящей статье, следуя принципу физической обоснованности модели, показано, что нарушение классической формулы полной вероятности при дизъюнкции несовместных событий также может иметь сугубо классический, биологически мотивированный механизм, реализуемый методом голографии Фурье. Механизм не апеллирует к квантовой физике ни по сути, ни на уровне формализма и коррелирует с нейрофизиологической концепцией «кольца возбуждения» – информационного синтеза в коре головного мозга [41–43].

Тема статьи имеет междисциплинарный характер, с учетом профессиональных интересов читательской аудитории материал дан преимущественно в терминах оптических систем и нейросетей. Терминология и формальный аппарат из смежных областей привлечены в минимально необходимых для связности изложения объемах с краткими пояснениями и ссылками на источники, содержащие их детальное изъяснение.

1. Описание проблемы

Принятие решений традиционно исследуется на модельных ситуациях, описываемых теорией игр. Для наглядности рассмотрим нарушение классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий применительно к некооперативной игре «Дилемма заключенного» [23–27].

Игра моделирует ситуацию, когда два злоумышленника А и В допрашиваются в полиции по отдельности, у каждого есть выбор: *C* (cooperate) – молчать или *D* (defect) – предать. *C* и *D* составляют полный набор альтернатив. Повлиять на решение подельника игрок не может.

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) [44] вариант *CC*, но в реальности, как правило, наблюдается [23–27] равновесие Нэша [45] *DD* – оба предают.

В экспериментах [23–27] игроку В предлагалось принять решение в трех возможных ситуациях:

- ему известно, что игрок А принял решение C^A ;
- ему известно, что игрок А принял решение D^A ;
- решение другого игрока ему неизвестно.

Статистическая обработка экспериментальных результатов дала порядок вероятностей решения игрока В «предать» (D^B) в зависимости от условий:

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

Значения вероятностей в разных исследованиях, как и в разных играх, несколько отличались, но всегда устойчиво наблюдался один и тот же порядок (1).

Проблема в том, что в классической теории вероятности согласно формуле полной (безусловной) вероятности для дизъюнкции несовместных событий

$$\Pr(D^B) = \Pr(D^B | D^A) \Pr(D^A) + \Pr(D^B | C^A) \Pr(C^A), \quad (2)$$

полная вероятность $\Pr(D^B)$ должна принадлежать интервалу условных: $[\Pr(D^B | D^A), \Pr(D^B | C^A)]$.

2. Подход к проблеме

Обозначим ключевые моменты нашего подхода.

1. В работах [23–27], [30–34] авторы принимали экспериментально полученные значения условных вероятностей как факт и фокусировались на поиске причин выхода экспериментально полученной полной вероятности $\Pr(D^B)$ из задаваемого формулой (2) интервала вероятностей условных. Изменим взгляд на проблему – примем первый и последний члены в (1) как данность и найдем реальный механизм, обеспечивающий попадание условной вероятности $\Pr(D^B | C^A)$ в границы диапазона $[\Pr(D^B | D^A), \Pr(D^B)]$.

2. В квантовой физике вероятность события $\sigma(x, y)$ в точке с координатами (x, y) определяется по правилу Борна как скалярное произведение его волновой функции или амплитуды вероятности $\psi_\sigma(x, y)$ [46]:

$$\Pr(\sigma(x, y)) = \langle \psi_\sigma(x, y), \psi_\sigma(x, y) \rangle. \quad (3)$$

Отсюда следует, что вероятность есть квадратичная мера на алгебре событий и по определению (3) математически строго эквивалентна интенсивности (мощности) как квадратичной мере на алгебре, порождаемой физическим процессом, устройством.

3. В [30] как обязательный для учета в модели атрибут процесса принятия решения человеком отмечен когнитивный диссонанс, для «Дилеммы заключенного» – принятие решения на первых итерациях его редуцирования. Когнитивный диссонанс возникает при поступлении информа-

ции, противоречащей правилу логического вывода, он проявляется в том числе и в технической системе, срывом устойчивости отклика системы и его затухающими колебаниями [47, 48].

Авторы [30] утверждают также, что хотя когнитивный диссонанс и может моделироваться классическим марковским процессом, только квантово-механический формализм позволяет моделировать нарушение (1) формулы полной вероятности (2).

В рамках очерченного подхода обратим внимание, что условие C^A противоречит оцениваемой альтернативе D^B , а для оценок $\Pr(D^B|D^A)$ и $\Pr(D^B)$ такого противоречия нет. Это означает, что оценкам $\Pr(D^B|D^A)$ и $\Pr(D^B)$ адекватна монотонная логика, в которой новая информация не изменяет правило логического вывода – логика принятия решения описывается правилом «Modus Ponens»: «предать – выгодно» или, что логически эквивалентно, «молчать – невыгодно».

Формирование оценки $\Pr(D^B|C^A)$ описывается уже логикой, в которой новая информация – условие C^A (подельник молчит) – противоречит правилу «предать – выгодно». Это логика с исключением [48, 49], её правило: «предать – выгодно, если подельник не молчит». Необходим переход к логике с исключением.

Такую перестройку логики обработки изображений обеспечивает $6f$ -схема голографии Фурье [48], показанная на рис. 1: $4f$ -схема строит монотонную логику, а голограмма H^2 хранит правило исключения.

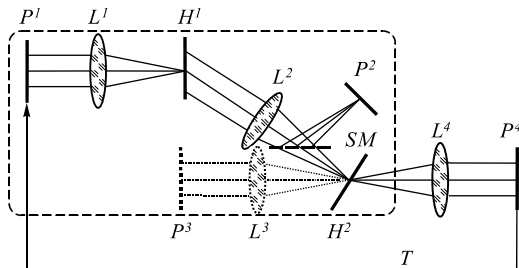


Рис. 1. $6f$ -схема голографии Фурье кольцевой архитектуры, порождающая логику с исключением: L^1, L^2, L^3, L^4 – фурье-преобразующие линзы; H^1 и H^2 – голограммы, хранящие правила монотонной логики и исключения соответственно; P^1, P^2, P^3 – плоскости: входная, корреляций (логического вывода) и эталона для записи голограммы исключения H^2 соответственно; светоделитель 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

Кольцевая архитектура схемы рис. 1 позволяет реализовать на логике с исключением атрибуты данной игры [30] – когнитивный диссонанс и его редуцирование [48]. Кольцевая архитектура соответствует и нейрофизиологической концепции кольца возбуждения – повторного входа сенсорного стимула в нейронные структуры после оценки в долговременной памяти его субъективной значимости [41–43].

Оптическая схема рис. 1 может быть представлена как трехслойная нейросеть с весами связей, формиру-

емыми и запоминаемыми в пространстве Фурье, принципиальная схема нейросети дана на рис. 2.

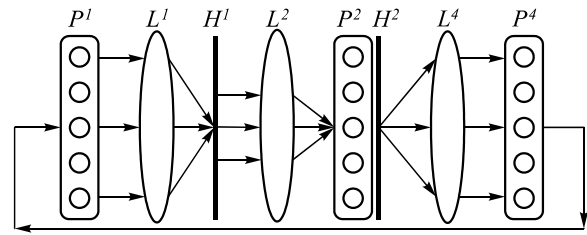


Рис. 2. Нейросетевая модель $6f$ -схемы голографии Фурье, связи даны условно, обозначения соответствуют рис. 1

Оптическая схема рис. 1 и её нейросетевая модель рис. 2 удовлетворяют критерию биологической мотивированности также и с учетом того, что, как показано в [50–52], нейронные структуры зрительной коры человека и высших животных реализуют преобразование Фурье и согласованную фильтрацию.

3. Модель

Детальное логико-алгебраическое описание схемы рис. 1 (нейросети рис. 2) оставим за рамками статьи, заинтересованный читатель найдет его в [53]. Рассмотрим реализацию схемой рис. 1 логики принятия решения при обработке волновых полей (изображений) в традиционных для оптики терминах и нотациях. Для связности изложения ниже частично используем ряд выкладок, представленных в [47, 48].

3.1. Выбор метода представления и ввода в систему обрабатываемой информации

Логика игры связывает две лингвистические переменные [54]: «вариант решения» и «оценка решения», её можно представить отображением из бинарной шкалы «вариант решения» на шкалу оценок:

$$\{C, D\} \rightarrow \{L, H\}, \tag{4}$$

где L – низкая оценка (невыгодно), H – высокая (выгодно). В общем случае шкалы могут быть не бинарными, так как человек использует непрерывные шкалы с нечеткими значениями [54], но для подачи на исполнительные органы решение должно быть четким. Для этого используется четкая мера решения (3).

Биологически мотивированный (нейросетевой) подход предполагает представление информации в системе аналогами картин нейронной активности – нейронных ансамблей, активируемых поступившей или вспомненной информацией [55]. В схеме рис. 1, рис. 2 значения переменной «решение»: «молчать» C и «предать» D представлены полями комплексных амплитуд $C(x, y)$ и $D(x, y)$ в плоскости P^1 , а значения переменной «оценка решения»: «невыгодно» L и «выгодно» H – полями $L(\zeta, \eta)$ и $H(\zeta, \eta)$ в плоскости P^2 .

Поля, репрезентирующие разные значения одной лингвистической переменной, должны иметь как определенную степень общности (переменная одна), так и отличий. Примем, что название переменной кодирует-

ся общим для всех значений спектром фаз поля, а её значения – отличающимися спектрами амплитуд.

Примем одну модель спектра амплитуд для всех значений переменной и будем различать их параметром v_α – частотой по уровню α от максимума. Таким образом порядок значений лингвистической переменной задается в пространстве Фурье и из (4) следуют возможные его варианты как связи значения лингвистической переменной и параметра спектра амплитуд поля, репрезентирующего данное значение:

$$\begin{aligned} D \succ C &\Leftrightarrow v_\alpha^D \geq v_\alpha^C \\ H \succ L &\Leftrightarrow v_\alpha^H \geq v_\alpha^L \end{aligned} \quad (5)$$

где \succ – символ отношения предпочтения, инверсный

$$\begin{aligned} D \succ C &\Leftrightarrow v_\alpha^D \leq v_\alpha^C \\ H \succ L &\Leftrightarrow v_\alpha^H \leq v_\alpha^L \end{aligned} \quad (6)$$

а также их линейные комбинации.

Для физически обоснованного выбора конкретно-го порядка и меры обратимся к схеме рис. 1.

3.2. Выбор метода записи голограммы для правила монотонной логики и меры на алгебре оценок

Пусть на голограмме H^1 записана картина интерференции фурье-образов эталона $R(x, y)$ и внесевого точечного опорного источника (на рис. 1 не показан), т.е. её передаточная функция в +1 порядке дифракции

$$H^1(v_x, v_y) = \Lambda^1(F^*(R(x, y))), \quad (7)$$

где оператор Λ^1 описывает дополнительную фильтрацию на голограмме H^1 , обусловленную нелинейностью экспозиционных характеристик голографической регистрирующей среды, F – символ преобразования Фурье, астериск – символ комплексного сопряжения. Тогда в плоскости P^2 $4f$ -схема формирует отклик, описываемый функцией взаимной корреляции объектного $\text{In}(x, y)$ и эталонного $R(x, y)$ полей:

$$\begin{aligned} \text{Out}^{2(\text{In}, R)}(\zeta, \eta) &= F\left[F(\text{In}(x, y))\Lambda^1\left(F^*(R(x, y))\right)\right] = \\ &= [\text{In}(x, y) \otimes R^{\Lambda^1}(x, y)], \end{aligned} \quad (8)$$

где в верхнем индексе при Out цифра указывает на плоскость формирования отклика, в скобках – сравниваемые поля, ζ, η – координаты в плоскости P^2 , \otimes – символ операции корреляции, верхний индекс Λ^1 указывает на фильтрацию $R(x, y)$ голограммой H^1 . В точке $\zeta=0, \eta=0$ амплитуда поля (8), т.е. глобального максимума функции автокорреляции (ГМ АКФ),

$$\text{Out}^{2(\text{In}, R)}(0, 0) = \langle \text{In}(x, y), R^{\Lambda^1}(x, y) \rangle. \quad (9)$$

Таким образом, $\text{Out}^{2(\text{In}, R)}(0, 0)$ есть квадратичная мера и по определению [46] эквивалентна вероятности.

В реальных корреляционных системах измеряется не само значение ГМ АКФ, а отношение сигнал – по-

меха, где помеха – средний квадрат кросскорреляционного поля [56]. Это отношение зависит от шумов и помех, а в качестве меры нужна характеристика, от них не зависящая. Этому требованию удовлетворяет радиус корреляции – r для функций одной переменной

$$\begin{aligned} H &= r_\beta^D, \\ L &= r_\beta^C, \end{aligned}$$

и для полей как функций двух переменных [56]

$$\begin{aligned} H &= (r_\beta^D)^2, \\ L &= (r_\beta^C)^2, \end{aligned}$$

где β – уровень измерения радиуса, показатель степени 2 для отличия от индекса вынесен за скобки.

Мера должна удовлетворять аксиоме монотонного неубывания. Поскольку радиус (площадь) корреляции связан с амплитудой ГМ АКФ (7) обратной зависимостью [56], то аксиома монотонности для r выполняется при порядке (5.2), т.е. имеем связь

$$D \succ C \Leftrightarrow v_\alpha^D \leq v_\alpha^C \Leftrightarrow r_\beta^D \geq r_\beta^C. \quad (10)$$

Запись голограммы H^1 (7) в схеме рис. 1 – обучение нейросети рис. 2 логически эквивалентно как связкой $D \rightarrow H$ («предать – выгодно»), так и «молчать – невыгодно» – связкой $C \rightarrow L$: значения H и L при записи голограммы H^1 представлены точечным опорным источником, а для отклика в плоскости P^2 – ГМ АКФ полей D и C соответственно. Но при записи голограммы связкой $D \rightarrow H$ в силу нелинейности экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред частотный диапазон голограммы H^1 согласно (10) будет уже, чем при записи $C \rightarrow L$. Оценка $r^{(\text{In}, D)}$ может быть только ниже эталонной $r^{(D, D)}$, т.к. радиус может только уменьшаться до дифракционного предела – получаем узкий диапазон изменений и низкую точность измерений оценок.

Проблема снимается при записи голограммы H^1 логически эквивалентным «негативным» правилом: «молчать (не предать) – невыгодно», т.е. парой $C \rightarrow L$

$$H^1(v_x, v_y) = \Lambda^1(F^*(C(x, y))). \quad (11)$$

Тогда отклик (8) $\text{Out}^{2(C, C)}(\zeta, \eta)$ задает нижнюю границу диапазона измерений радиуса корреляции $r^{(C, C)}$. Верхнюю границу диапазона измерений $r^{(D, C)}$ можно в первом приближении определить исходя из того, что согласно [56] величина отношения сигнал/помеха в корреляционном поле для функций одного аргумента описывается выражением

$$W^I = \frac{1}{2k} \frac{I^C}{r_\beta^C}, \quad (12)$$

где I^C – линейный размер образа «молчать», k – коэффициент, зависящий от вида АКФ, и для полей

$$W^s = \frac{1}{2k} \frac{I_x^C I_y^C}{(r_\beta)^2} \quad (13)$$

Тогда для образов, описываемых функцией одной переменной, диапазон измерений радиуса корреляции

$$\Delta^l = \frac{r_\beta^{(D,C)}}{r_\beta^{(C,C)}} \in \left[1, \frac{W^l}{W^{Min}} \right],$$

и для полей

$$\Delta^s = \frac{r_\beta^{(D,C)}}{r_\beta^{(C,C)}} \in \left[1, \sqrt{\frac{W^s}{W^{Min}}} \right],$$

где W^{Min} – пороговое значение, определяемое декоррелирующими факторами. Таким образом, в силу (12) и (13) при записи на голограмме H^1 правила «молчать – невыгодно» диапазон измерений пропорционален линейному размеру поля, представляющего значение переменной «решение» в плоскости P^1 .

Поэтому далее в статье, применительно к голографической схеме рис. 1 и её нейросетевой модели рис. 2, используем радиус корреляции как квадратичную меру, математически строго эквивалентную вероятности, т.е. $r^{D \equiv Pr(D)}$, $r^{D|C \equiv Pr(D|C)}$, $r^{C|D \equiv Pr(C|D)}$.

3.3. Формирование условной оценки на логике с исключением кольцевой bf-схемой голографии Фурье

В параграфе 2 мы отметили, что безусловная оценка (полная вероятность) формируется по правилу монотонной логики, реализуемой 4f-схемой. Условная оценка $r^{D|D}$, в которой условие не противоречит правилу, строится также по правилу монотонной логики, усиливая его – здесь достаточно 4f-схемы. Для получения интересующей нас условной оценки $r^{D|C}$, в которой условие C противоречит правилу $D \rightarrow H$, необходима уже логика с исключением. Для построения логики с исключением 4f-схема, реализующая вывод «молчать – невыгодно», дополняется третьим каскадом преобразования Фурье с линзой L^4 и голограммой H^2 , на которой записано исключение из основного правила: «если подельник не молчит» [47, 48].

Не вдаваясь в формализм алгебры логики, поясним, что с алгебраической точки зрения отрицание «не» – лишь частный случай операции, задающей дуальность определяющих модель операций. Схема голографии Фурье порождает алгебру, в которой дуальность определена прямой теоремой корреляции как частным случаем её аксиоматического определения и задается преобразованием Фурье [57]. Поэтому в схеме рис. 1 исключение представлено как связка $H \rightarrow F(C)$ – голограмма исключения H^2 записывается откликом 4f-схемы на поле, представляющее в плоскости P^1 «предать», и фурье-образом поля, представляющего в плоскости P^3 решение «молчать».

Теперь в контексте данной игры рассмотрим первые итерации в схеме рис. 1 как оценку решения, представленного полем (образом) в плоскости P^1 .

3.3.1. Нулевая итерация – информация о решении подельника (условие) отсутствует

4f-схема формирует безусловную оценку решения «предать»: голограмма H^1 записана согласно (10), в плоскости P^1 предьявляется поле $D(x, y)$ и в плоскости P^2 формируется поле

$$Out_0^{2(D,C)}(\zeta, \eta) = D(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y), \quad (14)$$

где нижний индекс – номер итерации. Измерение радиуса ГМ АКФ (12) дает значение «выгодно»

$$r^{2(D,C)} = r^D = H. \quad (15)$$

3.3.2. Условие – информация о молчании подельника – включается в логику рассуждений записью голограммы исключения H^2

На голограмме исключения H^2 записывается связка $H \rightarrow F(C)$: в плоскости P^3 предьявляется поле $C(x, y)$, репрезентирующее противоречащее правилу монотонной логики условие, и с откликом (14) записывается голограмма H^2

$$H^2(\zeta, \eta) = \Lambda^2 \left(\left(Out_0^{2(D,C)}(\zeta, \eta) \right)^* F(C(x, y)) \right). \quad (16)$$

3.3.3. Первая итерация «кольца возбуждения» – оценка решения подельника

После записи голограммы исключения (16) информация о молчании подельника представляется в плоскости P^1 полем $C(x, y)$. Отклик в плоскости P^4

$$Out_1^{4(C,C)}(x, y) = F \left[Out_0^{2(C,C)}(\zeta, \eta) \cdot H^2(\zeta, \eta) \right] = C^{\Lambda^2}(x, y) * F \left(Out_0^{2(C,C)}(\zeta, \eta) \right) \otimes F \left(Out_0^{\Lambda^2 2(D,C)}(\zeta, \eta) \right)$$

трактом T снова подается на вход схемы в плоскость P^1 , и в плоскости P^2 формируется отклик, представляющий оценку решения подельника «молчать»

$$Out_1^{2(C,C)}(\zeta, \eta) = Out_1^{4(C,C)}(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y) = C^{\Lambda^2}(x, y) * F \left(Out_0^{2(C,C)}(\zeta, \eta) \right) \otimes F \left(Out_0^{\Lambda^2 2(D,C)}(\zeta, \eta) \right) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y). \quad (17)$$

Сравним его с откликом на первой итерации на входной образ решения подельника «предать»:

$$Out_1^{2(D,C)}(\zeta, \eta) = Out_1^{4(D,C)}(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y) = C^{\Lambda^2}(x, y) * F \left(Out_0^{2(D,C)}(\zeta, \eta) \right) \otimes F \left(Out_0^{\Lambda^2 2(D,C)}(\zeta, \eta) \right) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y). \quad (18)$$

Выражения (17) и (18) отличаются только членами $F(Out_0^{2(C,C)}(\zeta, \eta))$ и $F(Out_0^{2(D,C)}(\zeta, \eta))$ соответственно. Согласно (10) имеем порядок безусловных оценок на нулевой итерации $r_0^C < r_0^D$. На первой круговой итерации учет условия голограммой исключения (16) да-

ет инверсию оценок $r_1^{cl} > r_1^{dl}$ – решение подельника «молчать» получает более высокую условную оценку, чем решение «предать».

Проведя аналогичное рассмотрение, можно видеть, что если голограмма исключения H^2 записывается по модели, отличной от (16), т.е. либо откликом на образ «молчать», либо образом в плоскости P^3 «предать», то в любом варианте на первой кольцевой итерации схема строит более высокую оценку решения подельника «молчать» сравнительно с «предать».

3.3.4. Вторая итерация «кольца возбуждения» – оценка собственного решения

Отклик схемы в плоскости P^2 на второй итерации на входное поле $C(x, y)$ (решение «молчать»)

$$\begin{aligned} \text{Out}_2^{2(c,c)}(\zeta, \eta) &= \text{Out}_2^{4(c,c)}(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y) = \\ &= C^{\Lambda^2}(x, y) * F(\text{Out}_1^{2(c,d)}(\zeta, \eta)) \otimes \\ &\otimes F(\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta, \eta)) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y), \end{aligned} \quad (19)$$

а на входной образ «предать»

$$\begin{aligned} \text{Out}_2^{2(d,c)}(\zeta, \eta) &= \text{Out}_1^{4(c,d)}(x, y) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y) = \\ &= C^{\Lambda^2}(x, y) * F(\text{Out}_1^{2(d,c)}(\zeta, \eta)) \otimes \\ &\otimes F(\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta, \eta)) \otimes C^{\Lambda^1}(x, y). \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, имеем $r_2^{dl} > r_2^{cl}$, то есть инверсию оценок сравнительно с первой итерацией – собственное решение игрока «предать» получает более высокую оценку, чем «молчать».

3.4. Условия и границы нарушения классической формулы полной вероятности

Найдем условия получения в схеме рис. 1 интересующего нас экспериментально наблюдавшегося [23–27] нарушения классической формулы полной вероятности, то есть порядка $r_2^{dl} > r_2^D$ вместо классического $r_2^{dl} < r_2^D$. Введем меру различия игроком альтернатив – согласно (5) примем мерой отношение радиусов спектров амплитуд полей, представляющих решения

$$V = \frac{v_\alpha^c}{v_\alpha^d}. \quad (21)$$

Как видно из (20), при $V=1$ всегда имеет место искомый порядок $r_2^{dl} > r_2^D$. Формируемая на нулевой итерации по правилу монотонной логики (11) оценка r^D , согласно (10) монотонно растет с ростом V , оценка r_2^{dl} , как можно видеть из анализа (20), антитонна по V при небольших значениях последней, поэтому возможная правая граница интересующего нас диапазона V^{Cross} , если она существует, определяется условием $r_2^{dl}(V^{Cross}) = r_0^D(V^{Cross})$. Найдем связь V^{Cross} с характеристиками полей и голограмм. Для наглядности и сравнения с результатами моделирования примем

приближение линейной записи голограммы H^2 (16) и Гауссовых спектров амплитуд. В предположении делимости переменных и изотропности поля вывод дадим для функций одной переменной.

V^{Cross} найдем из условия устойчивости отклика

$$\text{Out}_0^{2(d,c)}(\zeta) = \text{Out}_2^{2(d,c)}(\zeta).$$

С учетом (14) и (20), опустив простейшие преобразования, получаем

$$D(x) = C^{\Lambda^2}(x) * F(\text{Out}_1^{2(d,c)}(\zeta)) \otimes F(\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta)).$$

Можно видеть, что это условие имеет силу для всех итераций и соответствует устойчивому отклику

$$r_i^{dl} \Big|_{i \geq k} = r_\infty^{dl},$$

где k – число итераций, за которые система сходится. Таким образом, V^{Cross} не зависит от номера итерации и позволяет заменить номер итерации 1 на $i-1$. Переход в пространство Фурье дает

$$F(D(x)) = F(C^{\Lambda^2}(x)) \cdot \text{Out}_{i-1}^{2(d,c)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta))^*,$$

откуда следует условие устойчивости отклика

$$\text{Out}_{i-1}^{2(d,c)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta))^* = \frac{F(D(x))}{F(C^{\Lambda^2}(x))}. \quad (22)$$

Левая часть (20) при устойчивости отклика может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \text{Out}_{i-1}^{2(d,c)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta))^* &= (\text{Out}_0^{2(d,c)}(\zeta))^2 = \\ &= \left\{ F \left[F(D(x)) \cdot F^*(C(x)) \right] \right\}^2 = \\ &= \left\{ F \left[\exp \left(-\frac{v^2 (V^{Cross})^2}{2v_{0,606}^2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{v^2}{2v_{0,606}^2} \right) \right] \right\}^2 = \\ &= \left\{ F \left[\exp \left(-\frac{v^2 ((V^{Cross})^2 + 1)}{2v_{0,606}^2} \right) \right] \right\}^2 = \exp \left(-\frac{\zeta^2}{2\zeta_{0,606}^2} \right), \end{aligned}$$

где

$$\zeta_{0,606} = \frac{\sqrt{(V^{Cross})^2 + 1}}{\sqrt{2\pi}v_{0,606}}, \quad v_{0,606} \text{ и } \zeta_{0,606} -$$

параметры функций Гаусса, описывающих спектр $F(C)$ и ГМ АКФ соответственно в плоскости P^2 . Отсюда окончательное выражение для левой части (22)

$$\begin{aligned} \text{Out}_{i-1}^{2(d,c)}(\zeta) \cdot (\text{Out}_0^{\Lambda^2 2(d,c)}(\zeta))^* &= \\ &= \exp \left(-\frac{\zeta^2 \pi^2 (v_{0,606})^2}{(V^{Cross})^2 + 1} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Для правой части (22) согласно (21) получим

$$\frac{F(D(x))}{F(C(x))} = \exp\left(-\frac{v^2((V^{Cross})^2 - 1)}{2v_{0,606}^2}\right). \quad (24)$$

Подставив в (22) правые части (23) и (24) и введя измеряемый также по уровню 0,606 максимального значения ГМ АКФ радиус автокорреляции эталона, записанного на голограмме H^1 $r^{ACFGMP} = r^{2(C,C)} = \sqrt{2}/2\pi v_{0,606}$, получим интересующую нас связь значения параметра V^{Cross} , определяющего устойчивый отклик, с радиусом корреляции записанного на голограмме H^1 эталонного образа «молчать»:

$$V^{Cross} = \sqrt[4]{\frac{\xi^2}{2v^2\pi^2(r^{ACFGMP})^4} + 1} = \sqrt[4]{\frac{M^2}{2\pi^2(r^{ACFGMP})^4} + 1}, \quad (25)$$

где $M = \xi/v$ – масштаб преобразования Фурье, связывающего пространственную ξ и частотную v координаты в плоскости P^2 .

При больших значениях M , соответствующих реальным системам, для практических целей достаточно приближенного выражения

$$V^{Cross} = \frac{1}{r^{ACFGMP}} \sqrt{\frac{M}{\sqrt{2}\pi}}; \quad (26)$$

среднеквадратичное отклонение (25) от (26) для диапазона $r^{ACFGMP} \in [1, 20]$ составляет 0,15 для $M=50$ и 0,05 для $M=700$, монотонно убывая с ростом M .

В выражениях (25) и (26) явным образом отражена зависимость V^{Cross} от характеристики голограммы H^1 , а зависимость от характеристики голограммы H^2 неявно – она посредством (21) «сокрыта» в V^{Cross} .

4. Численное моделирование

4.1. Условия моделирования и результаты

Моделировалась работа показанной на рис. 1 6f-схемы голографии Фурье при реализации сценария игры «Дилемма заключенного». Фокусное расстояние линзы L^3 из соображений корректности расчетов было принято в два раза большим, чем фокусные расстояния остальных линз, радиусы откликов (ГМ АКФ) затем пересчитывались для условия равенства фокусных расстояний всех линз. Образы альтернатив (вариантов решений) моделировались реализациями стационарного случайного процесса с Гауссовым спектром амплитуд и случайным, нормально распределенным с дисперсией 2π спектром фаз.

Рассмотрены первые итерации возникновения и редуцирования когнитивного диссонанса. Исследовалась зависимость радиуса корреляции, измеряемого в плоскости P^2 , от меры различения альтернатив (21).

Как следует из (17), (18), (19) и (20), корреляционные отклики, формируемые схемой рис. 1 в плоско-

сти P^2 , зависят не только от параметров спектров образов альтернатив, но в значительной степени и от условий записи голограмм и экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред. В качестве интегральных параметров, учитывающих в совокупности все эти факторы, обуславливающих дополнительную фильтрацию на голограммах, использованы: r^{ACFGMP} – радиус АКФ записанного на голограмме H^1 (11) эталонного образа «молчать» $C(x)$, и r^{ACF} – радиус АКФ записанного на составной голограмме $H(v) = H^1(v)H^2(v)$ комбинированного образа, эталона $C(x)$ и исключения; r^{ACF} служит параметром порядка динамической системы рис. 1 [47].

Для примера на рис. 3 даны зависимости безусловной и условных оценок рассматриваемых альтернатив от меры их различения (21) для $r^{ACFGMP} = 3,1$ пкс.

На рис. 3 в диапазоне $V \in [1, V^{Cross}]$ наблюдается противоречащий классическому закону полной вероятности порядок $r_2^{D1C} > r^{D}$. Такой же порядок оценок имеет место и при других значениях r^{ACFGMP} , но со смещением точки V^{Cross} пересечений кривых 0 и D_i . На рис. 4 даны: результат численного моделирования и теоретическая (25) зависимости $V^{Cross}(r^{ACFGMP})$.

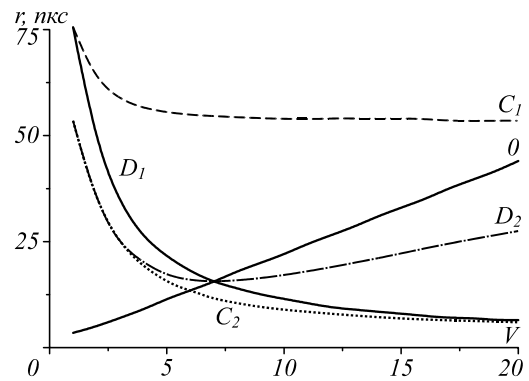


Рис. 3. Зависимости оценок вариантов решений от меры их различения V : 0 – безусловной оценки «предать» r^D ; C_i, D_i – условных оценок $r_i^{C/C}$ и $r_i^{D/C}$ соответственно на i -й итерации

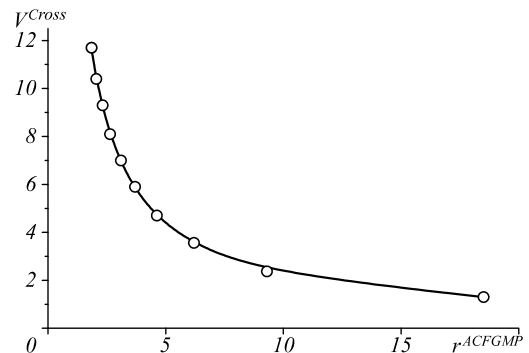


Рис. 4. Зависимость правой границы диапазона, в котором наблюдается нарушение классической формулы полной вероятности от радиуса АКФ образа, записанного на голограмме правила монотонной логики: точки – результаты численного моделирования, линия – модель (25)

При численном моделировании для сохранения принятой модели спектра амплитуд радиус АКФ ва-

ривировался изменением параметра $v_{0,606}$. При длине реализации спектров 2048 пикселей, среднеквадратичное отклонение точной модели (25) от результатов моделирования было 0,055, а приближенной (26) – 0,061. При введении пространственной фильтрации на голограмме H^1 , обусловленной нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред, функция Гаусса уже неадекватно аппроксимировала спектр амплитуд, соответственно, неадекватна была и модель (25), но обратный характер зависимости $V^{Cross}(r^{ACFGMP})$ сохранялся.

Для сравнения с опубликованными [23–27] результатами натуральных экспериментов на рис. 5 приведены зависимости отношения безусловной и условной оценок

$$\Omega(V) = \frac{r^D}{r_2^{D|C}}, \quad (27)$$

от меры различения альтернатив (21) для ряда значений параметра порядка системы r^{ACF} . Голограмма исключения (16) записывалась при текущем значении V .

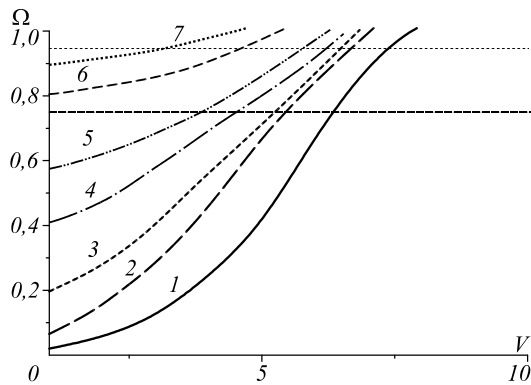


Рис. 5. Зависимости отношения Ω от меры различения альтернатив V для ряда радиусов АКФ составного образа, хранимого голограммами H^1 и H^2 : 1 – $r^{ACF} = 4,5$ пкс., 2 – $r = 8,5$ пкс., 3 – $r^{ACF} = 9$ пкс., 4 – $r^{ACF} = 13$ пкс., 5 – $r^{ACF} = 16$ пкс., 6 – $r^{ACF} = 23$ пкс., 7 – $r^{ACF} = 30$ пкс.; горизонтальными линиями показан диапазон экспериментально наблюдавшихся значений Ω [21–25]

4.2. Обсуждение

Из рис. 3–5 видно, что феномен нарушения классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий, т.е. $\Omega < 1$, имеет место в ограниченном диапазоне значений меры V различения игроком (лицом, принимающим решение) альтернатив. Этот диапазон зависит от характеристик хранимых голограммами эталонных образов, представляющих правила логического вывода – радиусов АКФ образа «молчать» r^{ACFGMP} (монотонная логика) (рис. 4) и составного образа логики с исключением r^{ACF} (рис. 5). Рис. 4 показывает, что «диапазон предательства», т.е. диапазон значений V , в котором условная вероятность «предать» при молчании подельника выше полной вероятности ($\Omega < 1$), расширяется с уменьшением r^{ACFGMP} . Радиус корреляции r^{ACFGMP}

представляет баланс общего и частного во внутренней картине мира игрока, его уменьшение соответствует росту внимания к частностям и деталям с ослаблением представления общей картины мира.

Совпадение с экспериментальными данными [23–27] наблюдается в ограниченном диапазоне значений V , зависящем от параметра порядка системы r^{ACF} . В этом плане рис. 5 иллюстрирует важность сохранения внутренней коррелированности как атрибута информации при её обработке, так как высокочастотная фильтрация, часто применяемая для оптимизации отношения сигнал-помеха, ведет к уменьшению r^{ACFGMP} [56], т.е. к сдвигу баланса общего и частного во внутренних представлениях игрока о мире в сторону увеличения внимания к частностям и, как следствие, к смещению диапазона значений V , в котором имеет место моделируемый феномен в сторону больших V .

Заключение

Таким образом, экспериментально обнаруженный и подтвержденный рядом независимых исследований [23–27] когнитивный феномен нарушения классического закона полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий, относимый к категории квантовых [26, 28–34], может иметь вполне классический механизм, реализуемый методом голографии Фурье и не требующий обращения к квантовой физике ни на уровне явлений и механизмов, ни на уровне формального математического описания. Подчеркнем, что этот вывод не следует трактовать как отрицание в принципе самой возможности наличия квантовых явлений и механизмов в биологическом мозге.

Обратим внимание, что показанная в статье модель хорошо соотносится со взглядом на квантовую вероятность как на расширение классической Колмогоровской модели введением в последнюю интерференционного члена [58]. В статье [58] интерференционный член введен в модель исходя из математических соображений; в настоящей статье интерференция оцениваемого решения $D(x, y)$ и условия, в терминах статьи [58] – физического контекста измерения $D(x, y)$, физически реализуется в плоскости P^3 при записи голограммы исключения H^2 . Таким образом, в статье показан физический механизм математической модели [58]: оба подхода не требуют обращения к сугубо квантовым явлениям и механизмам.

Вместе с тем соответствие результатов, даваемых представленным в статье классическим механизмом и формальным применением математического аппарата квантовой физики [26, 30–33], вне зависимости от гипотетической возможности актуальности квантовых механизмов в работе биологического мозга, практически перспективно в плане создания голографических симуляторов квантовых вычислителей.

Показанный в статье механизм соответствует биологически обоснованной концепции кольца возбуждения – повторного входа сенсорного стимула в

нейронные структуры после оценки его значимости в долговременной памяти [42–43]. В свою очередь, «кольцо возбуждения» рассматривается рядом исследователей как возможный материальный механизм формирования сознания. Если эта гипотеза верна, то представленные в статье результаты, возможно, могут оказаться полезными в плане решения проблемы интеллектуальной и моральной [59, 60] непрозрачности решений, принимаемых системами искусственного интеллекта. Этот вопрос в настоящее время становится практически актуальным с учетом всё более реального применения таких систем для принятия решений в военном деле [61–63], энергетике [64–55], инфраструктуре [67] и, соответственно, повышении цены ошибки.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-01-00676-а.

Литература

1. **Slussarenko, S.** Photonic quantum information processing: A concise review / S. Slussarenko, G.J. Pryde // *Applied Physics Reviews*. – 2019. – Vol. 6. – 041303. – DOI: 10.1063/1.5115814.
2. **Павельев, А.В.** Исследование немарковской динамики двух взаимодействующих кубитов на основе численного решения нелинейного стохастического уравнения Шрёдингера / А.В. Павельев, В.В. Семин // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 168-173. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-168-173.
3. **Khrennikov, A.** A quantum-like model of information processing in the brain / A. Khrennikov, M. Asano // *Applied Science*. – 2020. – Vol. 10, Issue 2. – 707. – DOI: 10.3390/app10020707.
4. Human-like computing: Report of a Workshop held on 17 & 18 February 2016, Bristol, UK [Electronical Resource]. – URL: <https://epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/humanlikecomputing/> (request date 23.06.2020).
5. **Lake, B.M.** Building machines that learn and think like people / B.M. Lake, T.D. Ullman, T.B. Tenenbaum, S.J. Gershman // *Behavioral and Brain Sciences*. – 2017. – Vol. 40. – e253. – DOI: 10.1017/S0140525X16001837.
6. **Gorbatevich, V.S.** FaceDetectNet: Face detection via fully convolutional network / V.S. Gorbatevich, A.S. Moiseenko, Y.V. Vizilter // *Computer Optics*. – 2019. – Vol. 43(1). – P. 63-71. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-63-71.
7. **Wang, W.** Development of convolutional neural network and its application in image classification: a survey / W. Wang, Y. Yang, X. Wang, W. Wang, J. Li // *Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 58, Issue 4. – 040901. – DOI: 10.1117/1.OE.58.4.040901.
8. **Брагин, А.Д.** Распознавание моторных образов на электроэнцефалограммах с помощью свёрточных нейронных сетей / А.Д. Брагин, В.Г. Спицын // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 482-487. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-669.
9. **Агафонова, Ю.Д.** Эффективность алгоритмов машинного обучения и свёрточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитнорезонансных томограммах головного мозга / Ю.Д. Агафонова, А.В. Гайдель, П.М. Зельтер, А.В. Капишников // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 266-273. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-671.
10. **Пашина, Т.А.** Сравнение алгоритмов выделения области интереса на компьютерных томограммах лёгких / Т.А. Пашина, А.В. Гайдель, П.М. Зельтер, А.В. Капишников, А.В. Никоноров // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 74-81. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-659.
11. **Васильченко, В.А.** Алгоритмизация процесса распознавания состояний физиологических объектов на основе специальных рентгеновских изображений / В.А. Васильченко, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 296-303. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-296-303.
12. **Горбачёв, В.А.** Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью свёрточных нейронных сетей / В.А. Горбачёв, И.А. Криворотов, А.О. Маркелов, Е.В. Котлярова // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 636-645. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-636.
13. **Dash, T.** Adversarial neural networks for playing hide-and-search board game Scotland Yard / T. Dash, S.N. Dambekodi, P.N. Reddy, A. Abraham // *Neural Computing and Applications*. – 2020. – Vol. 32. – P. 3149-3164. – DOI: 10.1007/s00521-018-3701-0.
14. **Богущ, Р.П.** Алгоритм сопровождения людей на видеопоследовательностях с использованием свёрточных нейронных сетей для видеонаблюдения внутри помещений / Р.П. Богущ, И.Ю. Захарова // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 109-116. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-565.
15. **Сарин, К.С.** Метод баггинга и отбор признаков в построении нечётких классификаторов для распознавания рукописной подписи / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 833-845. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-833-845.
16. **Рахманенко, И.А.** Автоматическая верификация диктора по произвольной фразе с применением свёрточных глубоких сетей доверия / И.А. Рахманенко, А.А. Шелупанов, Е.Ю. Костюченко // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 596-605. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-621.
17. **Tversky, A.** Judgment under uncertainty: heuristics and biases / A. Tversky, D. Kahneman // *Science*. – 1974. – Vol. 185. – P. 1124-1131. – DOI: 10.1126/science.185.4157.1124.
18. **Tversky, A.** The framing of decisions and the psychology of choice / A. Tversky, D. Kahneman // *Science*. – 1981. – Vol. 211. – P. 453-458. – DOI: 10.1126/science.7455683.
19. **Tversky, A.** Rational choice and the framing of decisions / A. Tversky, D. Kahneman // *Business*. – 1986. – Vol. 59. – P. 251-278. – DOI: 10.1086/296365.
20. **Kahneman, D.** Judgment under uncertainty: Heuristics and biases / D. Kahneman, P. Slovic, A. Tversky. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982.
21. **Kahneman, D.** Prospect theory – an analysis of decision under risk / D. Kahneman, A. Tversky // *Economics*. – 1979. – Vol. 47. – P. 263-292. – DOI: 10.2307/1914185.
22. **Tversky, A.** Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment / A. Tversky, D. Kahneman // *Psychological Review*. – 1983. – Vol. 90, Issue 4. – P. 293-315. – DOI: 10.1037/0033-295X.90.4.293.
23. **Tversky, A.** The disjunction effect in choice under uncertainty / A. Tversky, E. Shafir. // *Psychological Science*. – 1992. – Vol. 3, Issue 5. – P. 305-309. – DOI: 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00678.x.

24. **Crosson, R.** The disjunction effect and reason-based choice in games / R. Crosson // *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. – 1999. – Vol. 80. – P. 118-133. – DOI: 10.1006/obhd.1999.2846.
25. **Li, S.** Examining whether there is a disjunction effect in Prisoner's Dilemma games / S. Li, J. Taplin // *Chinese Journal of Psychology*. – 2002. – Vol. 44, Issue 1. – P. 25-46.
26. **Busemeyer, J.R.** Quantum game theory explanation of disjunction effects / J.R. Busemeyer, M. Matthew, Z.A. Wang // *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Cognition Science Society*. – 2006. – P. 131-135.
27. **Hristova, E.** Disjunction effect in prisoner's dilemma: evidences from an eye-tracking study / E. Hristova, M. Grinberg // *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognition Science Society*. – 2008. – P. 1225-1230.
28. **Adams, B.** Quantum effects in the brain: A review. / B. Adams, F. Petruccione // *AVS Quantum Science*. – 2020. – Vol. 2. – 022901. – DOI: 10.1116/1.5135170.
29. **Менский, М.Б.** Концепция сознания в контексте квантовой механики / М.Б. Менский // *Успехи физических наук*. – 2005. – Т. 175, № 4. – С. 413-435. – DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504c.0413.
30. **Trueblood, J.S.** Quantum probability theory as a common framework for reasoning and similarity / J.S. Trueblood, E.M. Pothos, J.R. Busemeyer // *Frontiers in Psychology*. – 2014. – Vol. 5. – 322. – DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00322.
31. **Pothos, E.M.** A quantum probability explanation for violations of 'rational' decision theory / E.M. Pothos, J.R. Busemeyer // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2009. – Vol. 279. – P. 2171-2178. – DOI: 10.1098/rspb.2009.0121.
32. **Busemeyer, J.R.** A quantum theoretical explanation for probability judgment "errors" / J.R. Busemeyer, E.M. Pothos, R. Franco, J.S. Trueblood // *Psychological Review*. – 2011. – Vol. 118, Issue 2. – P. 193-218. – DOI: 10.1037/a0022542.
33. **Broekaert, J.B.** The Disjunction Effect in two-stage simulated gambles. An experimental study and comparison of a heuristic logistic, Markov and quantum-like model / J.B. Broekaert, J.R. Busemeyer, E.M. Pothos // *Cognitive Psychology*. – 2020. – Vol. 117. – 101262. – DOI: 10.1016/j.cogpsych.2019.101262.
34. **Bagarello, F.** Quantum like modeling of decision making: Quantifying uncertainty with the aid of Heisenberg–Robertson inequality / F. Bagarello, I. Basieva, E.M. Pothos, A. Khrennikov // *Journal of Mathematical Psychology*. – 2018. – Vol. 84. – P. 49-56. – DOI: 10.1016/j.jmp.2018.03.004.
35. **He, Z.** An evidential dynamical model to predict the interference effect of categorization on decision making results / Z. He, W. Jiang // *Knowledge-Based Systems*. – 2018. – Vol. 150. – P. 139-149. – DOI: 10.1016/j.knsys.2018.03.014.
36. **Жёлтиков, А.М.** Критика квантового разума: измерение, сознание, отложенный выбор и утраченная когерентность / А.М. Жёлтиков // *Успехи физических наук*. – 2018. – Т. 188, № 10. – С. 1119-1128. – DOI: 10.3367/UFNr.2017.06.038155.
37. **Павлов, А.В.** Моделирование механизмов квантовой логики методом наложенных голограмм Фурье, основанном на нелинейности экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред / А.В. Павлов, В.В. Орлов // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49, № 3. – С. 246-252. – DOI: 10.1070/qe16996.
38. **Павлов, А.В.** Моделирование квантовой логики при линейной записи наложенных голограмм Фурье: феномен "Линда" / А.В. Павлов // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49, № 8. – С. 777-778. – DOI: 10.1070/qe17094.
39. **Pavlov, A.V.** Neural networks mechanisms for the quantum-like phenomenon "Linda" / A.V. Pavlov. – In: *Neural networks and neurotechnologies* / ed. by Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova. – Saint-Peterburg: VVM, 2019. – Chap. 20. – P. 145-163.
40. *Нормальная физиология* / Р.С. Орлов. – М.: ГЭОТАР-медиа, 2010. – 832 с. – ISBN: 978-5-9704-1662-4.
41. **Edelman, G.M.** The remembered present. A biological theory of consciousness / G.M. Edelman. – New York: Basics Books, 1989. – 346 p.
42. **Иваницкий, А.М.** Мозговая основа субъективных переживаний: гипотеза информационного синтеза / А.М. Иваницкий // *Журнал высшей нервной деятельности*. – 1996. – Т. 46, № 2. – С. 241-252.
43. **Ivanitskii, A.M.** Information synthesis in key parts of the cerebral cortex as the basis of subjective experience / A.M. Ivanitskii // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. – 1997. – Vol. 27. – P. 414-426. – DOI: 10.1007/BF02462943.
44. **Ногин, В.Д.** Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с. – ISBN: 5-9221-0274-5.
45. **Nash, J.F.** Non-cooperative games / J.F. Nash // *Annals of Mathematics*. – 1951. – Vol. 54, Issue 2. – P. 286-295. – DOI: 10.2307/1969529.
46. **Фейнман, Р.** Фейнмановские лекции по физике. Вып. 8 / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс : пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 260 с.
47. **Павлов, А.В.** Голографическая память с пополнением противоречивой информацией: влияние ослабления низких частот на устойчивость отклика / А.В. Павлов // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 728-736. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.
48. **Павлов, А.В.** Логика с исключением на алгебре фурье-дуальных операций: нейросетевой механизм редуцирования когнитивного диссонанса / А.В. Павлов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2014. – Т. 89, № 1. – С. 17-25.
49. **Reiter, R.** A logic for default reasoning / R. Reiter // *Artificial Intelligence*. – 1980. – Vol. 13, Issues 1-2. – P. 81-132. – DOI: 10.1016/0004-3702(80)90014-4.
50. **Глезер, В.Д.** Согласованная фильтрация в зрительной системе / В.Д. Глезер // *Оптический журнал*. – 1999. – Т. 66, № 10. – С. 10-14.
51. **Алексеев, С.В.** Архитектура связей в зрительной коре и зрительное опознавание / С.В. Алексеев // *Оптический журнал*. – 1999. – Т. 66, № 10. – С. 52-54.
52. **Krasilnikov, N.N.** Matched spatial filtering object images in the human visual system / N.N. Krasilnikov, O.I. Krasilnikova // *Proceedings of the 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF)*. – 2019. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/WECNF.2019.8840630.
53. **Павлов, А.В.** Алгебра фурье-дуальных операций: логика с исключением / А.В. Павлов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2012. – № 3. – С. 26-38.
54. **Заде, Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде // *Математика. Новое в зарубежной науке*. – М.: Мир, 1976. – Вып. 3. – 167 с.

55. **Борисюк, Г.Н.** Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги десятилетия / Г.Н. Борисюк, Р.М. Борисюк, Я.Б. Казанович, Г.Р. Иваницкий // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 10. – С. 1189-1214. – DOI: 10.3367/UFNr.0172.200210d.1189.
56. **Шубников, Е.И.** Отношение сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений / Е.И. Шубников // Оптика и спектроскопия. – 1987. – Т. 62, № 2. – С. 450-456.
57. **Павлов, А.В.** Об алгебраических основаниях Фурье-голографии / А.В. Павлов // Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т. 90, № 3. – С. 515-520.
58. **Хренников, А.Ю.** Формула полной вероятности с интерференционным членом / А.Ю. Хренников // Теория вероятностей и её применения. – 2006. – Т. 51, № 3. – С. 518-536. – DOI: 10.4213/tvp37.
59. **Cervantes, S.** Toward ethical cognitive architectures for the development of artificial moral agents / S. Cervantes, S. Lopez, L.-A. Cervantes // Cognitive Systems Research. – 2020. – Vol. 64. – P. 117-125. – DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.08.010.
60. **Qu, C.** Neurocomputational mechanisms underlying immoral decisions benefiting self or others / C. Qu, Y. Hu, Z. Tang, E. Derrington, J.-C. Dreher // Social Cognitive and Affective Neuroscience. – 2020. – Vol. 15, Issue 2. – P. 135-149. – DOI: 10.1093/scan/nsaa029.
61. **Tarraf, D.C.** The Department of Defense Posture for Artificial Intelligence: Assessment and recommendations / D.C. Tarraf, W. Shelton, E. Parker [et al.]. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2019. – DOI: 10.7249/RR4229.
62. **Sayler, K.M.** Artificial intelligence and national security [Electronical Resource] / K.M. Sayler // Congressional Research Service. R45178. 10 Nov. 2020. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R45178.pdf> (request date 02.02.2021).
63. **Du, J.** Army integrated combat model for synthetic force based on information cognition / J. Du, J. Xia, H. Li // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1533, Issue 2. – 022125. – DOI: 10.1088/1742-6596/1533/2/022125.
64. **Botros, H.** I-Guided reasoning-based operator support system for the nuclear power plant management / H. Botros, C.S. Tran, D. Nam // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 154. – 108079. – DOI: 10.1016/j.anucene.2020.108079.
65. **Tanveer, A.** Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities / A. Tanveer, Z. Dongdong, H. Chao [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 289. – 125834. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125834.
66. **Suman, S.** Artificial intelligence in nuclear industry: Chimera or solution? / S. Suman // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 278. – 124022. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124022.
67. **Davydenko, L.** Neural networks application for power consumption planning of the water supply facilities / L. Davydenko, N. Davydenko, V. Davydenko // 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). – 2020. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/eStream50540.2020.9108856.

Сведения об авторе

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: 190 научных трудов, 12 авторских свидетельств. ORCID: 0000-0001-6706-6619. E-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru.

ГРНТИ: 28.23.15, 28.23.24, 29.31.33

Поступила в редакцию 9 ноября 2020 г. Окончательный вариант – 3 марта 2021 г.

Modeling of quantum-like cognitive phenomena by the Fourier-holography technique under the choice of alternatives

A.V. Pavlov¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article is dedicated to the search for a biologically motivated mechanism of the cognitive phenomenon of violation of the classical formula of total probability for the disjunction of incompatible events, which is considered by a number of researchers as a quantum-like phenomenon. A classical mechanism implemented by the 6f Fourier holography scheme of the resonant architecture that does not require reference to quantum mechanics either in its physical nature or at the level of formalism is demonstrated. In the analysis, the decision-making is interpreted as a choice of alternatives by using the non-cooperative game "Prisoner's Dilemma". The approach to the task is based on the search for a mechanism for forming a conditional estimate under a condition that contradicts the rule of monotonous decision logic. It is demonstrated that this estimate, in contrast to the unconditional and conditional one with a non-contradictory condition, is formed by logic with exception. The ring architecture of the holographic setup corresponds to the biologically inspired neural network concept of the excitation ring and implements cognitive dissonance on logic with exception. Conditions and ranges of violation of the classical formula of total probability in relation to the correlation radius of the reference image recorded in a hologram storing the monotone logic inference rule are analytically determined. The analytical model is confirmed by a quantitative coincidence of the results of numerical modeling with the published results of natural experiments.

Keywords: Fourier holography, decision making, choice of alternatives, quadratic measure, estimate, quantum probability, non-cooperative games, logic with exclusion, cognitive dissonance, dynamical system, correlation length, order parameter.

Citation: 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.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research under grant #18-01-00676-a.

References

- [1] Slussarenko S, Pryde GJ. Photonic quantum information processing: A concise review. *Appl Phys Rev* 2019; 6: 041303. DOI: 10.1063/1.5115814.
 - [2] Pavelev AV, Semin VV. Investigation of non-markovian dynamics of two dipole interacting qubits based on numerical solution of the non-linear stochastic Schrödinger equation. [In Russian]. *Computer Optics* 2019; 43(2): 168-173. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-168-173.
 - [3] Khrennikov A, Asano M. A quantum-like model of information processing in the brain. *Appl Sci* 2020; 10(2): 707. DOI: 10.3390/app10020707.
 - [4] Human-like computing: Report of a Workshop held on 17 & 18 February 2016, Bristol, UK. Source: (<https://epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/humanlikecomputing>).
 - [5] Lake BM, Ullman TD, Tenenbaum TB, Gershman SJ. Building machines that learn and think like people. *Behavioral and Brain Sciences* 2017; 40: e253. DOI: 10.1017/S0140525X16001837.
 - [6] Gorbatshevich VS, Moiseenko AS, Vizilter YV. FaceDetectNet: Face detection via fully convolutional network. *Computer Optics* 2019; 43(1): 63-71. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-63-71
 - [7] Wang W, Yang Y, Wang X, Wang W, Li J. Development of convolutional neural network and its application in image classification: a survey. *Opt Eng* 2019; 58(4): 040901. DOI: 10.1117/1.OE.58.4.040901.
 - [8] Bragin AD, Spitsyn VG. Motor imagery recognition in electroencephalograms using convolutional neural networks. *Computer Optics* 2020; 44(3): 482-487. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-669.
 - [9] Agafonova YuD, Gaidel AV, Zelter PM, Kapishnikov AV. Efficiency of machine learning algorithms and convolutional neural network for detection of pathological changes in MR images of the brain. *Computer Optics* 2020; 44(2): 266-273. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-671.
 - [10] Pashina TA, Gaidel AV, Zelter PM, Kapishnikov AV, Nikonov AV. Automatic highlighting of the region of interest in computed tomography images of the lungs. *Computer Optics* 2020; 44(1): 74-81. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-659.
 - [11] Vasilchenko VA, Burkovskiy VL, Danilov AD. Algorithmization of the process of recognition of states of living objects based on special x-ray images. *Computer Optics* 2019; 43(2): 296-303. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-43-2-296-303.
 - [12] Gorbachev VA, Krivorotov IA, Markelov AO, Kotlyarova EV. Semantic segmentation of satellite images of airports using convolutional neural networks. *Computer Optics* 2020; 44(4): 636-645. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-636.
 - [13] Dash T, Dambekodi SN, Reddy PN, Abraham A. Adversarial neural networks for playing hide-and-search board game Scotland Yard. *Neural Comput Appl* 2020; 32: 3149-3164. DOI: 10.1007/s00521-018-3701-0.
-

- [14] Bohush RP, Zakharava IY. Person tracking algorithm based on convolutional neural network for indoor video surveillance. *Computer Optics* 2020; 40(1): 109-116. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-565.
- [15] Sarin KS, Hodashinsky IA. Bagged ensemble of fuzzy classifiers and feature selection for handwritten signature verification. *Computer Optics* 2019; 43(5): 833-845. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-833-845.
- [16] Rakhmanenko IA, Shelupanov AA, Kostyuchenko EYu. Automatic text-independent speaker verification using convolutional deep belief network. *Computer Optics* 2020; 44(4): 596-605. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-621.
- [17] Tversky A, Kahneman D. Judgment under uncertainty: heuristics and biases. *Science* 1974; 185: 1124-1131. DOI: 10.1126/science.185.4157.1124.
- [18] Tversky A, Kahneman D. The framing of decisions and the psychology of choice. *Science* 1981; 211: 453-458. DOI: 10.1126/science.7455683.
- [19] Tversky A, Kahneman D. Rational choice and the framing of decisions. *Business* 1986; 59: 251-278. DOI: 10.1086/296365.
- [20] Kahneman D, Slovic P, Tversky A. *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1982.
- [21] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory – an analysis of decision under risk. *Economics* 1979; 47: 263-292. DOI: 10.2307/1914185.
- [22] Tversky A, Kahneman D. Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. *Psychol Rev* 1983; 90(4): 293-315. DOI: 10.1037/0033-295X.90.4.293.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Li S, Taplin J. Examining whether there is a disjunction effect in Prisoner's Dilemma games. *Chinese Journal of Psychology* 2002; 44(1): 25-46.
- [26] 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.
- [27] Hristova E, Grinberg M. Disjunction effect in prisoner's dilemma: evidences from an eye-tracking. *Proc 30th Annual Conf of the Cognition Science Society* 2008; 1225-1230.
- [28] Adams B, Petruccione F. Quantum effects in the brain: A review. *AVS Quantum Science* 2020; 2: 022901. DOI: 10.1116/1.5135170.
- [29] Menskii MB. Concept of consciousness in the context of quantum mechanics. *Phys Usp* 2005; 48(4): 389-409. DOI: 10.1070/PU2005v048n04ABEH002075.
- [30] Trueblood JS, Pothos EM, Busemeyer JR. Quantum probability theory as a common framework for reasoning and similarity. *Front Psychol* 2014; 5: 322. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00322.
- [31] Pothos EM, Busemeyer JR. A quantum probability explanation for violations of 'rational' decision theory. *Proc Royal Soc B* 2009; 279: 2171-2178. DOI: 10.1098/rspb.2009.0121.
- [32] Busemeyer JR, Pothos EM, Franco R, Trueblood JS. A quantum theoretical explanation for probability judgment "errors" *Psychol Rev* 2011; 118(2): 193-218. DOI: 10.1037/a0022542.
- [33] Broekaert JB, Busemeyer JR, Pothos EM. The Disjunction Effect in two-stage simulated gambles. An experimental study and comparison of a heuristic logistic, Markov and quantum-like model. *Cogn Psychol* 2020; 117: 101262. DOI: 10.1016/j.cogpsych.2019.101262.
- [34] Bagarello F, Basieva I, Pothos EM, Khrennikov A. Quantum like modeling of decision making: Quantifying uncertainty with the aid of Heisenberg–Robertson inequality. *J Math Psychol* 2018; 84: 49-56. DOI: 10.1016/j.jmp.2018.03.004.
- [35] He Z, Jiang W. An evidential dynamical model to predict the interference effect of categorization on decision making results. *Knowl Based Syst* 2018; 150: 139-149. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.03.014.
- [36] Zheltikov AM. The critique of quantum mind: measurement, consciousness, delayed choice, and lost coherence. *Phys Usp* 2018; 61(10): 1016-1025. DOI: 10.3367/UFNe.2017.06.038155.
- [37] Pavlov AV, Orlov VV. Modelling the mechanisms of quantum logic using the method of superimposed Fourier holograms based on the nonlinearity of the exposure characteristics of holographic recording media [In Russian]. *Quantum Electronics* 2019; 49(3): 246-252. DOI: 10.1070/QEL16748.
- [38] Pavlov AV. Simulation of quantum logic in linear recording of superimposed Fourier holograms: Linda phenomenon [In Russian]. *Quantum Electronics* 2019; 49(8): 777-778. DOI: 10.1070/QEL16939.
- [39] Pavlov AV. Neural networks mechanisms for the quantum-like phenomenon "Linda". In Book: Shelepin Yu, Ogorodnikova E, Solovyev N, Yakimova E, eds. *Neural networks and neurotechnologies*. Ch 20. Saint-Petersburg: "VVM" Publisher; 2019: 145-163.
- [40] Orlov RS. *Normal physiology* [In Russian]. 2nd ed. Moscow: "GEOTAR-Media" Publisher; 2010. ISBN: 978-5-9704-1662-4.
- [41] Edelman GM. *The remembered present. A biological theory of consciousness*. New York: Basics Books; 1989.
- [42] Ivanitskii AM. The cerebral basis of subjective experiences: the hypothesis of information synthesis [In Russian]. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deiatelnosti* 1996; 46(2): 241-252.
- [43] 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.
- [44] Nogin VD. Decision-making in a multi-criteria environment: a quantitative approach [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2002. ISBN: 5-9221-0274-5.
- [45] Nash JF. Non-cooperative games. *Ann Math* 1951; 54(2): 286-295. DOI: 10.2307/1969529.
- [46] Feinman RF, Leighton RB, Sands M. *The Feinman lectures on physics*. Vol. 3. London: Addison-Wesley Publishing Company Inc; 1965.
- [47] Pavlov AV. Holographic memory updated by contradictory information: influence of low frequency attenuation on response stability. *Computer Optics* 2020; 44(5): 728-736. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.
- [48] Pavlov AV. Logic with exception on the algebra of fourierdual operations: neural net mechanism of cognitive dissonance reducing [in Russian]. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatcionnykh Technologii, Mekhaniki i Optiki* 2014; 89(1): 17-25.
- [49] Reiter R. A logic for default reasoning. *Artificial Intelligence* 1980; 13(1-2): 81-132.
- [50] Glezer VD. Matched filtering in the visual system. *J Opt Technol* 1999; 66(10): 853-856. DOI: 10.1364/JOT.66.000853.

-
- [51] Alekseenko SV. The architecture of connections in the visual cortex and visual recognition. *J Opt Technol* 1999; 66(10): 886-887. DOI: 10.1364/JOT.66.000886.
- [52] Krasilnikov NN, Krasilnikova OI. Matched spatial filtering object images in the human visual system. *Proceedings of the 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* 2019: 1-4. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840630.
- [53] Pavlov AV. Algebra of Fourier-dual operations: Logic with exclusion [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making* 2012; 3: 26-38.
- [54] Zadeh LA. The concept of a Linguistic Variable and its application to approximate reasoning – I. *Inf Sci* 1975; 8(1): 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- [55] Borisjuk GN, Borisyuk RM, Kazanovich YaB, Ivanitskii GR. Models of neural dynamics in brain information processing – the developments of 'the decade'. *Phys Usp* 2002; 45(10): 1073-1095. DOI: 10.1070/PU2002v045n10ABEH001143.
- [56] Shubnikov EI. Signal to noise ratio under correlation comparison of images. *Optics and Spectroscopy* 1987; 62(2): 268-272.
- [57] Pavlov AV. On algebraic foundations of Fourier holography. *Optics and Spectroscopy* 2001; 90(3): 452-457. DOI: 10.1134/1.1358459
- [58] Khrennikov AYu. A formula of total probability with interference term and the Hilbert space representation of the contextual Kolmogorov model. *Theory Probab its Appl* 2006; 51(3): 427-441. DOI: 10.1137/S0040585X97982505.
- [59] Cervantes S, Lopez S, Cervantes L-A. Toward ethical cognitive architectures for the development of artificial moral agents. *Cogn Syst Res* 2020; 64: 117-125. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.08.010.
- [60] Qu C, Hu Y, Tang Z, Derrington E, Dreher J-C. Neurocomputational mechanisms underlying immoral decisions benefiting self or others. *Soc Cogn Affect Neurosci* 2020; 15(2): 135-149. DOI: 10.1093/scan/nsaa029.
- [61] Tarraf DC, Shelton W, Parker E, et al. *The Department of Defense Posture for Artificial Intelligence: Assessment and recommendations*. Santa Monica, CA: RAND Corporation; 2019. DOI: 10.7249/RR4229.
- [62] Saylor KM. *Artificial intelligence and national security*. Congressional Research Service. R45178. Nov 10, 2020. Source: (<https://fas.org/sgp/crs/natsec/R45178.pdf>).
- [63] Du J, Xia J, Li H. Army integrated combat model for synthetic force based on information cognition. *J Phys Conf Ser* 2020; 1533(2): 022125. DOI: 10.1088/1742-6596/1533/2/022125.
- [64] Botros H, Tran CS, Nam D. I-Guided reasoning-based operator support system for the nuclear power plant management. *Ann Nucl Energy* 2021; 154: 108079. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.108079.
- [65] Tanveer A, Dongdong Z, Chao H, et al. Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *J Clean Prod* 2021; 289: 125834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125834.
- [66] Suman S. Artificial intelligence in nuclear industry: Chimera or solution? *J Clean Prod* 2021; 278: 124022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124022.
- [67] Davydenko L, Davydenko N, Davydenko V. Neural networks application for power consumption planning of the water supply facilities. *2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)* 2020: 1-4. DOI: 10.1109/eStream50540.2020.9108856.
-

Author's information

Alexander V. Pavlov, born in 1957, doctor science in Physics and Mathematics, senior researcher, docent of Photonics and Optoinformatics dep.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 190 scientific publications, 12 patents. ORCID: 0000-0001-6706-6619. E-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru.

Received November 9, 2020. The final version – March 3, 2021.
