

## Голографическая память с пополнением противоречивой информацией: влияние ослабления низких частот на устойчивость отклика

А.В. Павлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Рассмотрена 6f схема голографии Фурье резонансной архитектуры, реализующая пополнение памяти новой информацией, противоречащей ранее записанной. Показано, что обусловленное нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред ослабление низких частот в записанном на голограмме исходном эталонном образе в узком диапазоне фильтраций ведёт к неустойчивости отклика – режиму с перемежаемостью. Показано, что режим с перемежаемостью соответствует перестройке автокорреляционной функции записанного на голограммах составного эталона с одного диапазона значения параметров модели аппроксимации на другой. Показано, что радиус (длина) корреляции записанного на голограммах составного образа служит параметром порядка системы: его быстрое изменение предвещает потерю устойчивости отклика и переход к неустойчивому режиму с перемежаемостью. Приведены результаты численного моделирования.

**Ключевые слова:** голография Фурье, голографическая память, ассоциативная память, корреляция, корреляционная функция, длина корреляции, динамическая система, параметр порядка, устойчивость, перемежаемость, немонотонная логика, логика с исключением.

**Цитирование:** 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.

**Citation:** 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.

### Введение

Голографическая память, относящаяся к классу ассоциативной, актуальна в ряде практических задач, например, криптографии, оперативного контроля и безопасности [1–4]. Различают два типа такой памяти: автоассоциативную, восстанавливающую эталонный образ при предъявлении его дефектной или искаженной версии [5], и гетероассоциативную, восстанавливающую образ, связанный с эталоном входного; к последнему типу относятся и голографические корреляторы, в которых изображение опорного источника используется как сигнал распознавания. Оба типа памяти реализуются 4f схемой голографии Фурье, различаясь только плоскостью вывода восстановленного образа: для автоассоциативной памяти это плоскость изображений, а для корреляторов – корреляций. Голографическая память может служить ключевым элементом искусственных нейронных сетей [6], эффективно применяемых в задачах криптографии, контроля и распознавания [1–4, 7–10].

Задача оперативного контроля, как и ряд иных [1], предполагает постоянное пополнение памяти. Выделяют две модели обновления информации:

1) если новая информация не противоречит ранее запомненной, то есть не требует изменения логики системы, то пополнение реализуется классическим методом наложенных голограмм [11], формально система описывается моделью монотонной логики;

2) с усложнением задач информационных систем актуализируется ситуация, когда новая информация противоречит хранимой; в этом случае работа системы описывается уже немонотонной логикой [12, 13].

Простейший вид немонотонной логики – логика с исключением, которая строится добавлением к правилу вывода монотонной логики «если ..., то ...» операции исключения «если ... не ...» [13]. Для удобства читателя дадим наглядный пример такой логики: «Если яблоко большое, то оно хорошее, если не перекармлено химическими удобрениями» – тут новая информация заставляет пересмотреть старое правило.

Изложение логико-алгебраического формализма здесь опустим, заинтересованный читатель найдёт его в работах [14–16]. В статье [14] показано, что логика с исключением в классе нечётко-значимых [17] реализуется 6f схемой голографии Фурье, показанной на рис. 1 (в параграфе 1). В работе [18], в развитие [16], показано, что при организации динамического процесса замыканием резонатора и идентичности спектров фаз образов, используемых для записи голограмм основного правила и исключения, динамика схемы при линейности записи голограмм конвергентна: система сходится к устойчивому состоянию корреляционного поля. Далее в статье для краткости корреляционное поле будем называть откликом системы.

Ограниченность динамического диапазона голографических регистрирующих сред (ГРС) обуславли-

вадет ограниченность частотного диапазона голограмм Фурье [19]. Этот диапазон выбирается исходя из условий задачи, в частности, отношения «сигнал-помеха» [20, 21], устойчивости сигнала распознавания к факторам декорреляции [22–24] и т.п. [25]. Как правило, голограммы Фурье записываются в диапазоне средних пространственных частот, что ведёт к ослаблению, вплоть до режекции, низкочастотных компонент записанных образов. В [26] показано, что режекция низких пространственных частот на голограмме Фурье может вести к деградации глобального максимума автокорреляционной функции (ГМ АКФ) и росту боковых максимумов выше ГМ АКФ. Но если кросс-корреляционное, т.е. без доминирующего ГМ АКФ, поле устойчиво, то оно пригодно для дальнейшей обработки, например, по модели регрессии [27].

Вместе с тем переход по мере ослабления на голограмме низких пространственных частот от одного типа устойчивого поля корреляций (с выраженным ГМ АКФ, т.е. унимодального) к другому – с доминирующими боковыми максимумами (мультиимодальному) происходит не скачком, но через режим неустойчивого отклика в узком диапазоне фильтраций. Этот переходный диапазон фильтраций в [18] исследован не был, но на практике он исключительно важен, т.к. перемежаемость, т.е. срыв квазиустойчивого отклика с изменением его типа с унимодального на мультиимодальный (или наоборот), означает невозможность реализации заданной модели обработки.

В настоящей статье, в развитие [18], исследован диапазон фильтраций, в котором наблюдается неустойчивость отклика бф схемы голографии Фурье при переходе от корреляционного поля с выраженным ГМ АКФ, т.е. устойчивого унимодального, к устойчивому мультиимодальному. Показано, что режим неустойчивого поля связан с перестройкой автокорреляционной функции записанного на голограмме исходного образа с одного значения параметра модели аппроксимации автокорреляционной функции составного эталонного образа на другой.

### 1. Оптическая схема и модель

Для удобства читателя ниже дадим краткое описание оптической схемы на рис. 1 и модели, опираясь на анализ, подробно изложенный в статье [18].

Голограмма Фурье  $H_1$  как голографический согласованный фильтр записывается эталонным образом  $A(x, y)$  с плоским внесосевым опорным пучком (на схеме не показан) и хранит правило вывода монотонной логики в классе нечётко-значимых [14, 15]:

$$H_1(v_x, v_y) = \Lambda_1(F^*(A(x, y))), \quad (1)$$

где  $v_x, v_y$  – пространственные частоты,  $\Lambda_1$  – оператор, учитывающий нелинейность экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред (ЭХ ГРС) и условия записи голограммы,  $F$  –

символ преобразования Фурье, звездочка обозначает комплексное сопряжение.

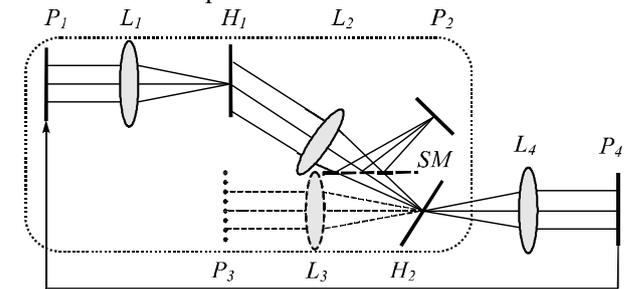


Рис. 1. бф схема голографии Фурье резонансной архитектуры, реализующая логику с исключением:  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – фурье-преобразующие линзы;  $H_1$  и  $H_2$  – голограммы правил монотонной логики и исключения соответственно;  $P_1$  – входная плоскость;  $P_2$  – плоскость корреляции; светоделиватель  $SM$  формирует две идентичные плоскости  $P_2$ : для вывода поля (размещения сенсора) и записи голограммы исключения  $H_2$ ;  $P_3$  – плоскость эталонного образа при записи голограммы исключения  $H_2$ ; стрелка снизу оптической схемы – замыкание резонатора  $P_4 \rightarrow P_1$  (оптическое или видеотрактом); рамкой обведена 4f схема

При предъявлении во входной плоскости  $P_1$  распознаваемого образа  $B(x, y)$  отклик голограммы в +1 порядке дифракции в задней фокальной плоскости  $P_2$  второй фурье-преобразующей линзы  $L_2$  (плоскости корреляций) описывается функцией корреляции:

$$C(\zeta, \eta) = F \left[ F(B(x, y)) \Lambda_1(F^*(A(x, y))) \right] = [B(x, y) \otimes A_{\Lambda_1}(x, y)], \quad (2)$$

где  $\zeta, \eta$  – координаты в корреляционной плоскости  $P_2$ ,  $\otimes$  – символ операции корреляции, нижний индекс  $\Lambda_1$  обозначает, что эталон  $A(x, y)$  фильтрован голограммой (1) вследствие нелинейности ЭХ ГРС.

Для реализации логики с исключением к 4f схеме добавляется еще один каскад преобразования Фурье с голограммой  $H_2$ , хранящей правило исключения: оно представлено картиной интерференции отклика голограммы  $H_1$  (2) с фурье-образом изображения  $E(\chi_x, \chi_y)$  в плоскости  $P_3$ , с которым связано исключение:

$$H_2(\zeta, \eta) = \Lambda_2(F(E(\chi_x, \chi_y)) C_R^*(\zeta, \eta)), \quad (3)$$

где  $\Lambda_2$  – оператор, учитывающий нелинейность ЭХ ГРС и условия записи голограммы (3), нижний индекс  $R$  обозначает, что поле (2), используемое для записи голограммы (3), есть АКФ, т.е. отклик голограммы (1) при предъявлении ей эталона  $A(x, y)$ .

При предъявлении во входной плоскости образа  $B(x, y)$ , отличающегося от эталонного образа  $A(x, y)$  только спектром амплитуд при идентичности их спектров фаз, голограмма  $H_2$  формирует в плоскости  $P_4$  с координатами  $\chi_x, \chi_y$  поле Out:

$$\text{Out}(\chi_x, \chi_y) = F \left\{ C(\zeta, \eta) \Lambda_2 \left[ F(E(\chi_x, \chi_y)) C_R^*(\zeta, \eta) \right] \right\}. \quad (4)$$

В задаче распознавания эталонный  $A(x, y)$  и распознаваемый  $B(x, y)$  образы обычно имеют частично отличные спектры фаз. Но, как следует из выражения (4), при исследовании вопроса устойчивости отклика схемы требование на идентичность спектров фаз входного и эталонного образов позволяет упростить анализ, исключив влияние декоррелирующих факторов [22–24] без потери общности, так как в этом случае корреляционное поле не зависит от параметров входного образа, но определяется только свойствами самой схемы – характеристиками голограмм  $H_1$  и  $H_2$ .

Поле (4) при замыкании резонатора подаётся во входную плоскость  $P_1$ , и развивается итерационный процесс. На  $n$ -й итерации поле в плоскости корреляций  $P_2$  описывается выражением:

$$C_n(\zeta, \eta) = F(C_{n-1}(\zeta, \eta)) * \left\{ \left[ E_{\Lambda_2}(x, y) \otimes F(C_R(\zeta, \eta)) \right] \otimes A_{\Lambda_1}(x, y) \right\}, \quad (5)$$

где \* – символ операции свёртки.

Поскольку при формировании поля (5) голограмма  $H_2$  связана с голограммой  $H_1$  двойным преобразованием Фурье, реализуемым линзами  $L_4, L_1$ , то выражение (5) можно представить в виде

$$C_n(\zeta, \eta) = F(C_{n-1}(\zeta, \eta)) * F(H_1(v_x, v_y) \cdot H_2(v_x, v_y)), \quad (6)$$

где фокусные расстояния линз  $L_4$  и  $L_1$  приняты равными. Отсюда получим двойственное (6) выражение:

$$F(C_n(\zeta, \eta)) = C_{n-1}(\zeta, \eta) (H_1(v_x, v_y) \cdot H_2(v_x, v_y)). \quad (7)$$

Член  $H_1(v_x, v_y) \cdot H_2(v_x, v_y)$  в (6) и (7) описывает обновлённую информацию, включающую как старое правило монотонной логики (1), хранимое голограммой  $H_1$ , так и новое исключение (3), представленное голограммой  $H_2$ . Их связь удобно представить в виде

$$H_1(v_x, v_y) = \frac{1}{H_2(v_x, v_y)} \cdot \frac{F(C_n(\zeta, \eta))}{C_{n-1}(\zeta, \eta)}. \quad (8)$$

Устойчивое состояние системы даётся решением одного из равноправных уравнений (6), (7) при условии  $C_n(\zeta, \eta) = C_{n-1}(\zeta, \eta)$ . Поскольку аналитическое решение уравнений (6) и (7) затруднительно, далее используем численное моделирование.

## 2. Моделирование

### 2.1. Динамика откликов системы в корреляционной плоскости

Исследована динамика отклика  $C_n(\zeta, \eta)$  (в корреляционной плоскости  $P_2$ ) для ряда отношений параметров спектров амплитуд эталонов  $A(x, y)$  и  $E(\chi_x, \chi_y)$

$$V = \frac{V_{0,606}^F}{V_{0,606}^A}, \quad (9)$$

где  $v_{0,606}$  – частота (пространственная) по уровню 0,606 Гауссового спектра амплитуд эталона, указанного верхним индексом. Эталонные и входные образы моделировались реализациями стационарного случайного процесса с Гауссовым спектром амплитуд и случайным спектром фаз с нормальным распределением при дисперсии  $2\pi$ , длина реализаций – 4096 пикселей. Моделировалось до 524200 итераций.

Рассмотрена зависимость динамики поля (6) от параметров фильтрации на голограмме  $H_1$ : исследовалась зависимость изменения радиуса ГМ АКФ по уровню 0,606 от номера итерации  $r(n)$ . Причины выбора для анализа этого параметра следующие.

1. В работах [20, 21] показано, что отношение сигнал-помеха  $\Omega$  в корреляционном поле описывается:

$$\Omega \sim k \frac{S_R}{2\pi r}, \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от вида АКФ сравниваемых полей,  $S_R$  – площадь эталонного образа  $A(x, y)$ . Фильтрация на голограммах (1) и (3) влечёт за собой изменение радиуса корреляции  $r$  [19, 25, 26].

2. При аналитическом описании системы в классе нечётко-значимых логик измеряемой характеристикой логического заключения, т.е. мерой на алгебре логики, является именно радиус корреляции [14–16].

Ослабляющий, вплоть до режективирования, низкие частоты фильтр задавался моделью

$$\mathfrak{F}(v) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(v-v_0)^2}{2 \cdot (v_{0,606})^2}\right), & \text{if } v \leq v_0, \\ 1, & \text{if } v > v_0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $v_0$  – центральная частота функции Гаусса. Параметром фильтра взята относительная ширина низкочастотной (ослабляющей) полосы фильтра  $[0, v_0]$ :

$$v_R = \frac{v_{0,606}}{v_0}. \quad (12)$$

Значения центральной частоты  $v_0$  в модели фильтра (11) выбирались из соображений адекватности моделирования пространственно-частотных характеристик (зависимостей локальной дифракционной эффективности от пространственной частоты) голограмм Фурье реальных изображений, т.е. дающими узкую полосу поглощения фильтра (11) [19, 26].

На рис. 2 даны примеры трёх типов динамики, характерных для схемы с рис. 1 в зависимости от значения параметра фильтра  $v_R$  при значениях параметров:  $v_0 = 40$  (здесь и далее частота нормирована на длину реализации),  $V = 8$ . Динамика дана для 200 итераций, далее её характер при указанных значениях параметров сохраняется: устойчивый конвергентный для «а» и «в», режим с перемежаемостью – для «б».

На рис. 3 приведены соответствующие этим трем типам динамики сечения поля (6) в плоскости  $P_2$ : «а»

и «в» в устойчивом режиме (на 500-й итерации), на «б» – в квазиустойчивом (с перемежаемостью).

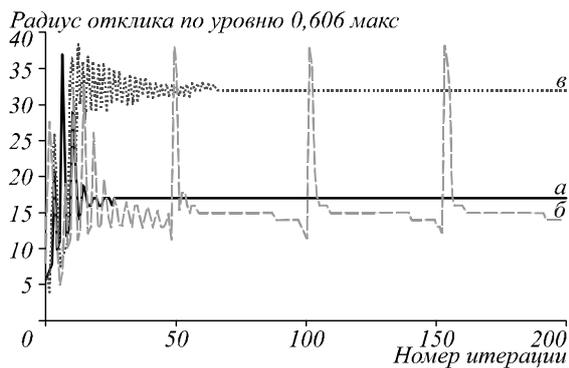


Рис. 2. Примеры типичной динамики системы рис. 1 – зависимости радиуса отклика в корреляционной плоскости  $P_2$  по уровню 0,606 максимального значения от номера итерации при значениях параметров  $V=8$ ,  $v_0=40$ :  
 а – конвергентная динамика – схождение к устойчивому унимодальному отклику,  $v_R=0,45$ ;  
 б – конвергентная динамика – схождение к режиму с перемежаемостью,  $v_R=0,43$ ; в – конвергентная динамика – схождение к устойчивому мультимодальному отклику,  $v_R=0,35$

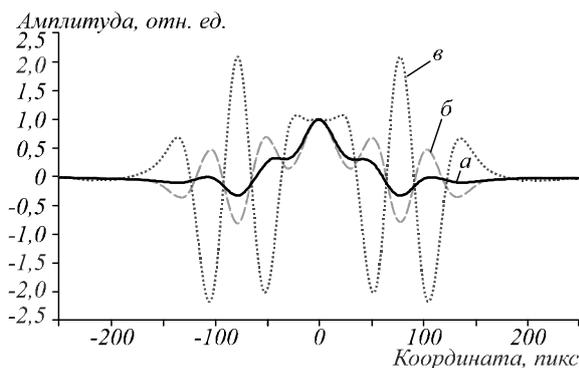


Рис. 3. Сечения поля в корреляционной плоскости  $P_2$ : обозначения кривых соответствуют рис. 2

При других значениях параметров фильтра  $v_0$  и эталонных образов  $V$  также наблюдаются три типа динамики, показанные на рис. 2, сами отклики могут отличаться от приведённых на рис. 3.

Нас интересует динамика отклика с перемежаемостью (рис. 2б) – квазиустойчивый унимодальный отклик, характеризующийся наличием ГМ АКФ, существенно превосходящего по амплитуде боковые максимумы, время от времени теряет свою устойчивость и превращается в неустойчивый мультимодальный, каждый раз самостоятельно возвращаясь затем к квазиустойчивому унимодальному. Примеры таких нормированных на максимальное значение откликов на ряде итераций, соответствующих квазиустойчивым и неустойчивым состояниям, даны на рис. 4.

Из сравнения рис. 4 и рис. 3 видно, что в состоянии срыва квазиустойчивого состояния отношение амплитуд боковых максимумов к амплитуде ГМ АКФ (кривая «в» на рис. 4) значительно превосходит аналогичное отношение для устойчивого режима (кри-

вой «в» на рис. 3) – для кривой «в» на рис. 4 оно равно 49 против 2 для кривой «в» на рис. 3, в то время как в квазиустойчивом состоянии ГМ АКФ явно выражен, превосходит по амплитуде боковые максимумы (кривая «а» на рис. 4). Диапазон значений относительной ширины полосы фильтра  $v_R$ , в котором наблюдается неустойчивость отклика, как и частота срывов квазиустойчивого отклика, зависят от параметра  $V$ , описывающего отношение полуширин спектров амплитуд эталонных образов  $E(x, y)$  и  $A(x_s, y_s)$  (9) и параметра  $v_0$  фильтра (11). На рис. 5 даны зависимости частоты срывов квазиустойчивого отклика в зависимости от относительной ширины полосы  $v_R$  фильтра (11) для ряда значений параметров  $v_0$  и  $V$ .

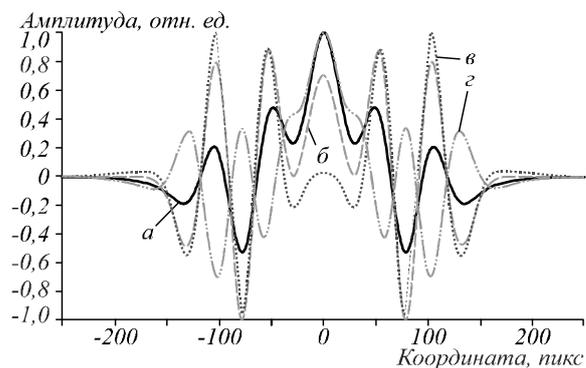


Рис. 4. Сечения откликов схемы рис. 1 в корреляционной плоскости на разных итерациях  $n$  в режиме с перемежаемостью, данном на рис. 2, кривая «б», ( $v_R=0,43$ ) при значениях параметров  $V=8$ ,  $v_0=40$ :  $n=170$ , квазиустойчивый, унимодальный отклик (а);  $n=200$ , начало неустойчивости, мультимодальный отклик (б);  $n=205$ , максимум неустойчивости, мультимодальный отклик (в);  $n=209$ , затухание срыва, мультимодальный отклик (г)

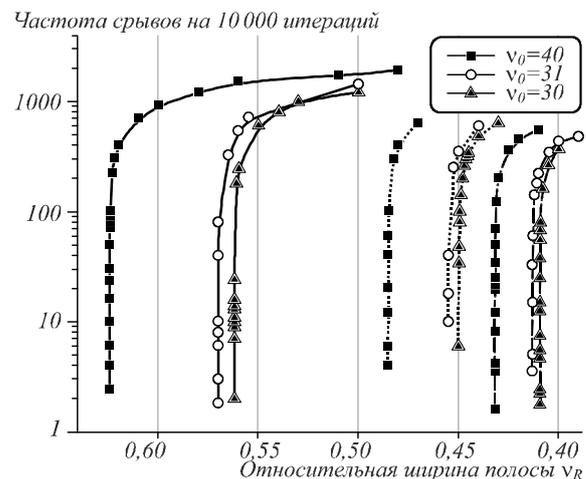


Рис. 5. Зависимости частоты срывов квазиустойчивого отклика от относительной ширины полосы фильтра: сплошная линия –  $V=4$ ; пунктир –  $V=6$ ; штриховая –  $V=8$

### 2.2. Анализ функции автокорреляции составного образа

На рис. 5 обращает на себя внимание, что диапазон квазиустойчивого отклика зависит не только от параметров фильтра, но в большей степени и от па-

раметра  $V$ . Поэтому попытка привязать тип динамики отклика к параметрам только фильтрации малопродуктивна и для анализа причин появления такого типа динамики целесообразно обратиться к характеристикам записанного на входящей в выражения (6) и (7) составной голограмме  $H(v_x, v_y) = H_1(v_x, v_y) \cdot H_2(v_x, v_y)$ , которую можно определить как голограмму образа, составленного из эталонов: исходного  $A(x, y)$  и исключения  $E(\chi_x, \chi_y)$  – далее назовём его составным образом. В качестве такой интегральной характеристики возьмём функцию автокорреляции записанного на голограммах  $H_1$  и  $H_2$  составного образа (АКФ СО) и рассмотрим её связь с типом динамики.

На рис. 6 даны сечения АКФ СО для ряда значений относительных ширин фильтра  $v_R$  при значениях параметров  $v_0$  и  $V$ , соответствующих рис. 2 и рис. 3, для сравнения дано сечение АКФ СО при  $v_R = 1$ , т.е. очень слабой фильтрации, на рис. 7 приведены соответствующие кривым на рис. 6 фильтрующие функции.

Из рис. 6 видно, что ослабление низких частот в спектре эталонного образа  $A(x, y)$ , записанного на голограмме  $H_1(v_x, v_y)$ , ведёт к появлению прогиба ГМ АКФ СО с его дальнейшим углублением и формированием нового бокового максимума на примерно вдвое меньшем расстоянии от ГМ АКФ СО (рис. 6б), чем расстояние первого бокового максимума в АКФ СО, соответствующей устойчивому режиму (рис. 6а). При этом «старый» боковой максимум в неустойчивом режиме практически остаётся на месте.

Такой сценарий изменения АКФ СО характерен именно для ослабления низких частот в узкой полосе (небольших значений  $v_0$ ) и существенно отличается от изменения АКФ СО при «обычной» высокочастотной фильтрации, характеризующейся плавным ослаблением низких частот в достаточно широком спектральном диапазоне – в таком случае с усилением фильтрации происходит сужение ГМ АКФ СО без кардинального изменения его формы. Эта особенность сценария изменения АКФ СО при рассматриваемой

фильтрации, типичной именно для голограмм Фурье [19, 26], важна в силу того, что форма ГМ АКФ отражает внутреннюю связность как важнейший атрибут информации, отличающий её от дельта-коррелированного шума. Прогиб ГМ АКФ СО показывает нарушение внутренней связности записанной на составной голограмме информации на небольших расстояниях, соответствующих экстремуму прогиба (на рис. 6 – порядка 30 пикселей) при сохранении прежней связности и на меньших, и на больших расстояниях.

Для оценки внутренней связности используем длину (радиус) корреляции – радиус ГМ АКФ по определённому в зависимости от модели АКФ и задачи уровню, как правило, в диапазоне  $[0,1, 0,606]$  максимального значения ГМ АКФ. На рис. 6 обращает на себя внимание то, что прогиб ГМ АКФ СО в режиме с перемежаемостью (кривые «б» и «в») соответствует именно этому диапазону.

На рис. 8 даны зависимости радиуса корреляции ГМ АКФ СО по разным уровням для  $V = 6$  (рис. 8а) и  $V = 8$  (рис. 8б), границы диапазонов неустойчивости отмечены вертикальными штриховыми линиями.

Немонотонность зависимости по уровню 0,1 перед её резким спадом на рис. 8а обусловлена тем, что формирующийся при такой фильтрации новый боковой максимум превышает уровень измерения длины корреляции. Из рис. 8 видно, что резкое уменьшение радиуса корреляции опережает переход системы в режим с перемежаемостью как слева, т.е. при усилении фильтрации, предсказывая переход от режима устойчивого унимодального отклика к неустойчивому, так и справа (при ослаблении фильтрации), предвещая переход от режима устойчивого мультимодального отклика к неустойчивому унимодальному. Таким образом, радиус корреляции составного образа эталонов  $A(x, y)$  и  $E(x, y)$ , записанных на составной голограмме, является параметром порядка системы, контроль которого позволяет предвидеть переход системы в неустойчивое состояние с перемежаемостью.

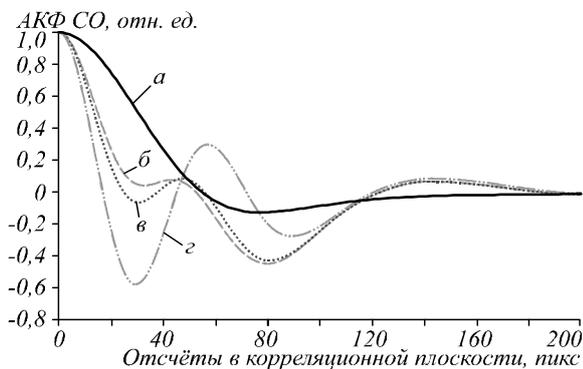


Рис. 6. Сечения АКФ составного образа при значениях параметров  $V = 8$ ,  $v_0 = 40$ :  $v_R = 1$  (а);  $v_R = 0,45$  (б);  $v_R = 0,43$  (в);  $v_R = 0,35$  (г)

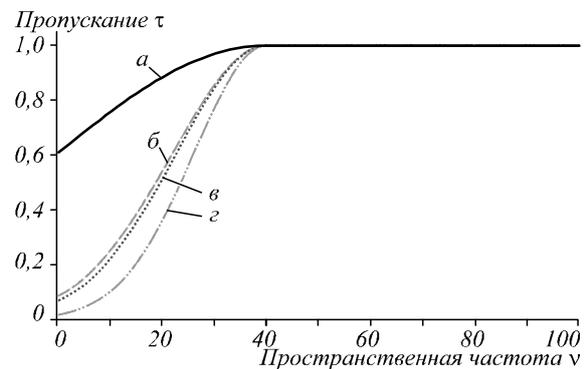


Рис. 7. Фильтрующие функции на голограмме  $H_1$ , обозначения соответствуют обозначениям на рис. 6

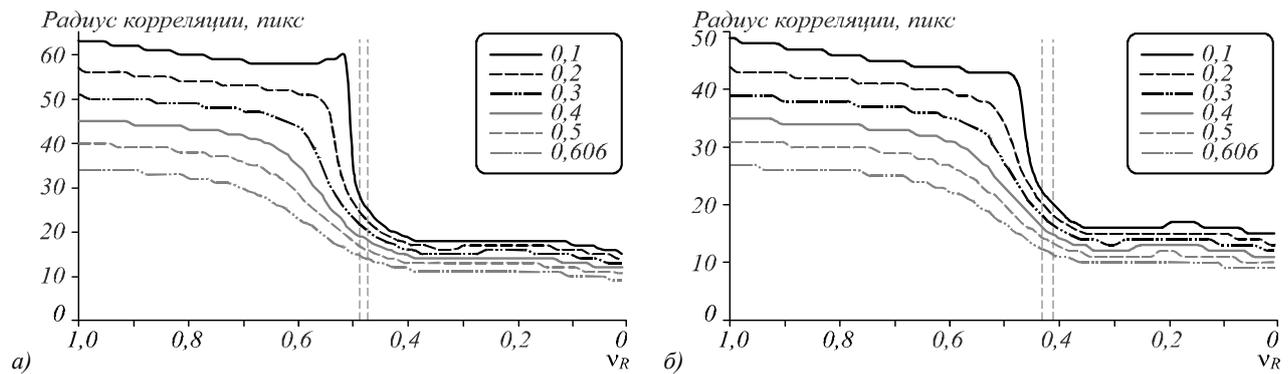


Рис. 8. Зависимости радиуса корреляции составного образа, записанного на голограммах  $H_1$  и  $H_2$ , от относительной ширины фильтра при  $V=6$  (рис. 8а) и  $V=8$  (рис. 8б), вертикальными линиями показаны диапазоны неустойчивости

На рис. 6, чтобы не загромождать рисунок, показана только ограниченная область корреляционного поля – ГМ АКФ СО и один боковой максимум. При анализе всего корреляционного поля можно видеть, что в режимах устойчивого отклика (рис. 2, кривые «а» и «в») боковые максимумы, характерные для АКФ ограниченной реализации [28], могут быть аппроксимированы гармонической функцией. В неустойчивом режиме с перемежаемостью (рис. 2, кривая «б») прогиб ГМ АКФ СО и новый максимум расположены в области «старого» ГМ АКФ СО и для своей аппроксимации требуют другого значения параметра функции Cos. С углублением прогиба ГМ АКФ по мере ослабления низких частот происходит «подтягивание» старых боковых максимумов на расстояния, соответствующие новому, т.е. имеет место перестройка всей АКФ.

Для проверки гипотезы о том, что неустойчивый режим соответствует кардинальной перестройке АКФ СО, исследована связь среднеквадратичного отклонения (СКО) АКФ СО от модели, адекватно аппроксимирующей АКФ ряда реальных процессов [28]:

$$C(\zeta) = \text{Cos}(a \cdot \zeta) \exp\left(\frac{-\zeta^2}{2b^2}\right). \quad (13)$$

На рис. 9 даны зависимости СКО аппроксимации АКФ СО моделью (13) для  $V=6$  и  $V=8$ , на рис. 10 – зависимости оптимальных по критерию минимума среднего квадрата отклонения значений параметров функции аппроксимации (13) от значения параметра фильтра  $v_R$ . Для других величин  $V$  зависимости качественно подобны.

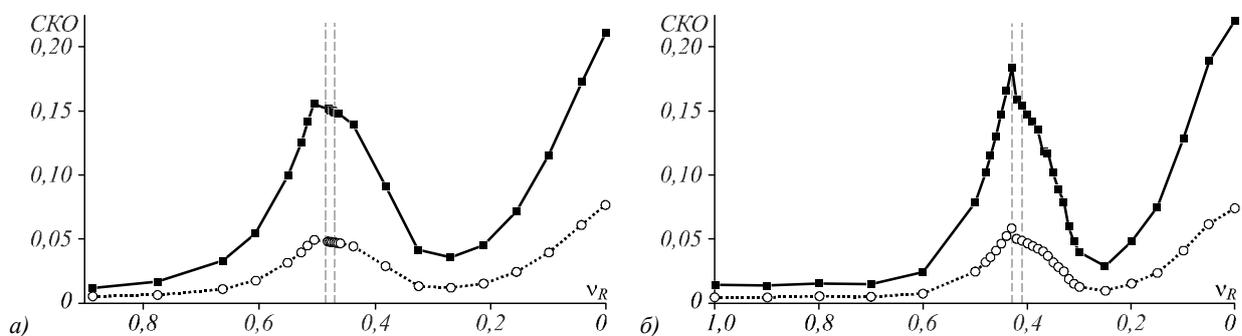


Рис. 9. Зависимости СКО аппроксимации АКФ СО моделью (13) от относительной полосы фильтра: рис. 9а –  $V=6$ , рис. 9б –  $V=8$ ; сплошная линия – аппроксимация в диапазоне  $[0, 200]$  пикселей; пунктир –  $[0, 2000]$  пикселей

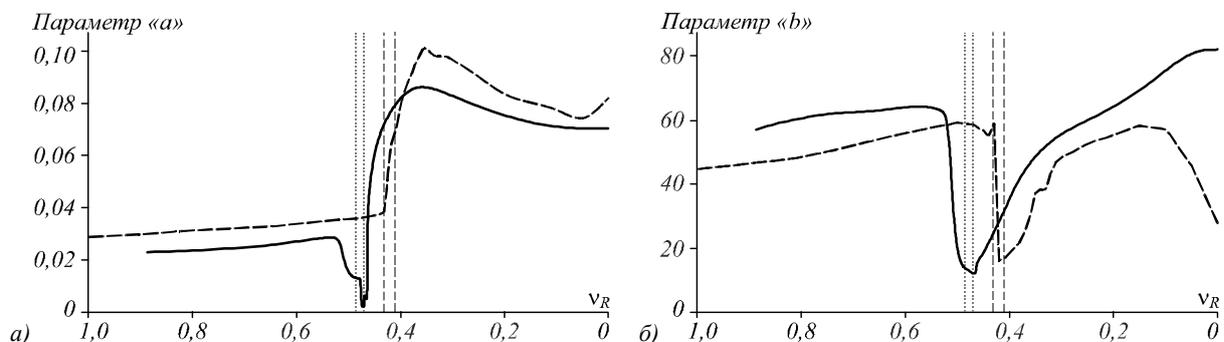


Рис. 10. Зависимости оптимальных по критерию минимума СКО параметров функции аппроксимации (13) АКФ СО от относительной полосы фильтра: сплошные линии –  $V=6$ , штриховые –  $V=8$ ; вертикальные пунктирные и штриховые линии показывают диапазоны неустойчивости отклика (6)

Зависимости, данные на рис. 9 и рис. 10 с учётом рис. 5 и рис. 6, наглядно показывают связь неустойчивости корреляционного поля (5) с перестройкой всей АКФ СО: параметров модели аппроксимации (13) с диапазонов значений, соответствующих устойчивому унимодальному отклику, на соответствующие также устойчивому, но мультимодальному отклику. В диапазонах устойчивых откликов модель аппроксимации (13) адекватна измеренному радиусу корреляции, а в диапазоне переменяемости – не адекватна, так как прогиб ГМ АКФ СО (формирующийся новый минимум) делит его на две примерно равные части (рис. 6) с разными значениями параметра «b» аппроксимирующей функции Гаусса. Новый минимум также требует для своего описания нового значения параметра «a» функции Cos, примерно в два раза отличного от нужного для аппроксимации колебательной структуры АКФ, соответствующей устойчивому режиму.

### Заключение

Таким образом, при пополнении голографической ассоциативной памяти информацией, противоречащей ранее записанной, т.е. по модели логики с исключением, возможен режим неустойчивого отклика.

Физической причиной появления неустойчивости отклика голографической схемы является фильтрация, обусловленная ограниченностью динамического диапазона голографических регистрирующих сред – ослабление, вплоть до режекции, низких пространственных частот на голограмме Фурье, хранящей исходный эталонный образ. Неустойчивость отклика возникает в узком диапазоне фильтраций как переходный режим от одного типа устойчивого отклика, характеризующегося при распознавании исходного эталона наличием выраженного глобального максимума автокорреляционной функции, к другому, отличающемуся превышением боковыми максимумами корреляционной функции её глобального максимума. Последний тип корреляционного поля также несёт информацию о распознаваемом образе и эталоне, но предполагает другую модель обработки – не корреляционно-экстремальную, а регрессионную [27].

Фундаментальной информационной причиной появления неустойчивости отклика является локальное, только на небольших, сравнимых с радиусом корреляции, расстояниях, нарушение внутренней связности информации, представленной записанным в памяти составным образом, включающим как старую, так и новую, противоречащую старой, информацию. Это нарушение внутренней связности манифестирует нарушением монотонности глобального максимума автокорреляционной функции составного образа – появлением его прогиба. По мере усиления фильтрации этот прогиб преобразуется в новый минимум, а вся структура автокорреляционной функции перестраивается под новые значения радиуса корреляции и, соответственно, параметров описывающей авто-

корреляционную функцию модели. Завершению перестройки автокорреляционной функции соответствует переход к устойчивому режиму. Этот механизм перестройки автокорреляционной функции составного образа позволяет использовать радиус её корреляции как параметр порядка рассматриваемой системы: его быстрое изменение предвещает переход к неустойчивому режиму с перемежаемостью отклика как при усилении, так и при ослаблении фильтрации.

В статье анализ дан применительно к решению задачи распознавания голографической корреляционной системой. Поскольку автокорреляционная функция хранимого образа универсальна в том плане, что характеризует систему на функциональном уровне, т.е. независимо от плоскости вывода отклика и реализации («в железе»), то результаты применимы и к ассоциативной памяти и, возможно, к дифракционным системам иной реализации, но аналогичной функциональной, т.е. резонансной схемы: как компьютерным, так и физическим, например, композитным [29–31].

Динамика системы, представленная на рис. 2 кривой «б», аналогична феномену истерик: квазипериодическим срывам устойчивости отклика «на ровном месте», лабильностью эмоций и самопроизвольным затуханием. Эти аналогии на феноменологическом уровне позволяют осторожно предположить, что ослабление низких частот при восприятии информации может быть и функциональной причиной истерии. Эта гипотеза не противоречит результатам нейрофизиологических исследований, показывающим связь психических расстройств с нарушениями межнейронных связей [31], но в силу различия физической природы процессов в оптической и биологической системах подлежит тщательной проверке.

### Благодарности

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

### Литература

1. **Kwak, C.H.** Volume holographic optical encryption and decryption in photorefractive LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal / C.H. Kwak, G.Y. Kim, B. Javidi // Optics Communications – 2019. – Vol. 437. – P. 95-103. – DOI: 10.1016/j.optcom.2018.12.049.
2. **Blau, Y.** Meta-hologram-based authentication scheme employing a speckle pattern fingerprint / Y. Blau, O. Bar-On, Y. Hanein, A. Boag, J. Scheuer // Optics Express. – 2020. – Vol. 8, Issue 6. – P. 8924-8936. – DOI: 10.1364/OE.388233.
3. **Zhang, L.-Z.** Multiple-image encryption based on optical scanning holography using orthogonal compressive sensing and random phase mask / L.-Z. Zhang, X. Zhou, D. Wang, N. Li, X. Bai, Q. Wang // Optical Engineering. – 2020. – Vol. 59, Issue 10. – 102411 (10 p.). – DOI: 10.1117/1.OE.59.10.102411.
4. **Yan, A.** Multiple-image encryption based on angular-multiplexing holography with quick response code and spiral phase keys / A. Yan, C. Lu, J. Yu, M. Tang, J. Dong,

- Z. Hu, H. Zhang // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Issue 34. – P. G6-G10. – DOI: 10.1364/AO.58.0000G6.
5. **Psaltis, D.** Optical information processing based on an associative-memory model of neural nets with thresholding and feedback / D. Psaltis, N. Farhat // *Optics Letters*. – 1985. – Vol. 10, Issue 2. – P. 98-100.
  6. **Соколов, В.К.** Оптические нейронные сети на базе голографических корреляторов / В.К. Соколов, Е.И. Шубников // *Квантовая электроника*. – 1995. – Т. 22, № 10. – С. 1067-1071.
  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. **Амосов, О.С.** Локализация человека в кадре видеопотока с использованием алгоритма на основе растущего нейронного газа и нечеткого вывода / О.С. Амосов, Ю.С. Иванов, С.В. Жиганов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 46-58. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-46-58.
  9. **Shimobaba, T.** Convolutional neural network-based data page classification for holographic memory / T. Shimobaba, N. Kuwata, M. Homma, T. Takahashi, Y. Nagahama, M. Sano, S. Hasegawa, R. Hirayama, T. Kakue, A. Shiraki, N. Takada, T. Ito // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, Issue 26. – P. 7327-7330. – DOI: 10.1364/AO.56.007327.
  10. **Агафонова, Ю.Д.** Эффективность алгоритмов машинного обучения и сверточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитно-резонансных 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.
  11. **Микаэлян, А.Л.** Запись большого числа изображений методом наложения голограмм / А.Л. Микаэлян, В.И. Бобринев, Л.З. Соколова // *Доклады АН СССР*. – 1970. – Т. 191, № 4. – С. 799-800.
  12. **Benferhat, S.** Nonmonotonic reasoning, conditional objects and possibility theory/ S. Benferhat, D. Dubois, H. Prade, // *Artificial Intelligence*. – 1997. – Vol. 92, Issue (1-2). – P. 259-276. – DOI: 10.1016/S0004-3702(97)00012-X.
  13. **Reiter, R.** A logic for default reasoning / R. Reiter // *Artificial Intelligence*. – 1980. – Vol. 13, Issue (1-2). – P. 81-132. – DOI: 10.1016/0004-3702(80)90014-4.
  14. **Павлов, А.В.** Об алгебраических основаниях фурье-голографии / А.В. Павлов // *Оптика и спектроскопия*. – 2001. – Т. 90, № 3. – С. 515-520.
  15. **Павлов, А.В.** Об алгебраических основаниях голографической парадигмы в искусственном интеллекте: алгебра Фурье-дуальных операторов / А.В. Павлов // V Международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Труды конференции. – М.: Физматлит, 2009. – Т. 1. – С. 140-148.
  16. **Павлов, А.В.** Алгебра фурье-дуальных операций: логика с исключением / А.В. Павлов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2012. – № 3. – С. 26-38.
  17. **Zadeh, L.** Fuzzy sets / L. Zadeh // *Information and Control*. – 1965. – Vol. 8, Issue 3. – P. 338-353.
  18. **Павлов, А.В.** Влияние условий записи голограмм и нелинейности регистрирующих сред на динамические характеристики схемы голографии Фурье резонансной архитектуры / А.В. Павлов // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 119, № 1. – С. 151-159.
  19. **Кулешов, А.М.** Влияние нелинейности среды и пространственных ограничений фильтра на параметры сигнала в голографическом корреляторе / А.М. Кулешов, Е.И. Шубников // *Оптика и спектроскопия*. – 1986. – Т. 60, № 3. – С. 606-609.
  20. **Шубников, Е.И.** Отношение сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений / Е.И. Шубников // *Оптика и спектроскопия*. – 1987. – Т. 62, № 2. – С. 450-456.
  21. **Шубников, Е.И.** Влияние аддитивных и мультипликативных помех при корреляционном сравнении изображений / Е.И. Шубников // *Оптика и спектроскопия*. – 1987. – Т. 62, № 3. – С. 653-658.
  22. **Кулешов, А.М.** Влияние изменения масштаба и поворота изображений и сдвига фильтра на сигнал голографического коррелятора / А.М. Кулешов, Е.И. Шубников // *Оптика и спектроскопия*. – 1983. – Т. 55, № 1. – С. 161-165.
  23. **Кулешов, А.М.** Влияние наклона изображения на сигнал голографического коррелятора / А.М. Кулешов, А.В. Павлов, Е.И. Шубников // *Оптика и спектроскопия*. – 1985. – Т. 59, № 2. – С. 315-419.
  24. **Павлов, А.В.** Влияние геометрических искажений на корреляцию изображений / А.В. Павлов // *Оптика и спектроскопия*. – 1991. – Т. 70, № 5. – С. 1337-1341.
  25. **Кулешов, А.М.** Об оптимальности голографического согласованного фильтра / А.М. Кулешов, Е.И. Шубников, С.А. Смаева // *Оптика и спектроскопия*. – 1986. – Т. 60, № 6. – С. 1273-1276.
  26. **Александрина, С.А.** Влияние режекции низких пространственных частот спектра на параметры сигнала в голографическом корреляторе / С.А. Александрина, А.М. Кулешов // *Оптика и спектроскопия*. – 1990. – Т. 68, № 3. – С. 652-655.
  27. **Павлов, А.В.** О применимости модели линейной регрессии к описанию фурье-голографии / А.В. Павлов // *Оптика и спектроскопия*. – 2005. – Т. 98, № 6. – С. 1033-1037.
  28. **Яглом, А.М.** Корреляционная теория стационарных случайных функций / А.М. Яглом. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 280 с.
  29. **Doskolovich, L.D.** Resonant properties of composite structures consisting of several resonant diffraction gratings / L.D. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, N.A. Golovastikov, V.A. Soifer // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 18. – P. 25814-25828. – DOI: 10.1364/OE.27.025814.
  30. **Butt, M.A.** A serially cascaded micro-ring resonator for simultaneous detection of multiple analytes / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2019. – Vol. 29, Issue 4. – 046208. – DOI: 10.1088/1555-6611/ab0371.
  31. **Bezus, E.A.** Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances / E.A. Bezus, L.D. Doskolovich, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 19. – P. 25814-25828. – DOI: 10.1364/OE.26.025156.
  32. **Baizabal-Carvalho, J.F.** Pathogenesis and pathophysiology of functional (psychogenic) movement disorders / J.F. Baizabal-Carvalho, M. Hallett, J. Jankovic // *Neurobiology of Disease*. – 2019. – Vol. 127. – P. 32-44. – DOI: 10.1016/j.nbd.2019.02.013.

*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](mailto:pavlov@phoi.ifmo.ru).

---

*ГРНТИ: 28.23.15, 28.23.24, 29.31.33*

*Поступила в редакцию 14 ноября 2019 г. Окончательный вариант – 8 мая 2020 г.*

---

---

# Holographic memory updated by contradictory information: influence of low frequency attenuation on response stability

A. V. Pavlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

## Abstract

A 6f-scheme of Fourier holography with resonant architecture is considered, which implements memory replenishment with new information that contradicts the previously recorded. It is shown that the low-frequency attenuation due to the nonlinearity of the exposure characteristics of holographic recording media in the initial reference holographic image recorded in a narrow filtering range corresponding to the degradation in the correlation plane of the global maximum of the autocorrelation function below the lateral maxima leads to the response instability — an intermittent mode. It is shown that the intermittent mode corresponds to the restructuring of the autocorrelation function of a composite standard recorded in holograms from one range of values of the approximation model parameters to another. It is shown that the correlation length of the composite image recorded in holograms is an order parameter of the system; its rapid change precedes the loss of response stability and the transition to an unstable regime with intermittency. The results of numerical simulation are presented.

**Keywords:** Fourier holography, holographic memory, associative memory, correlation function, correlation length, dynamical system, order parameter, stability, intermittency, non-monotonic logic, logic with exclusion.

**Citation:** 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.

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

## References

- [1] Kwak CH, Kim GY, Javidi B. Volume holographic optical encryption and decryption in photorefractive LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal. *Opt Commun* 2019; 437: 95-103. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.12.049.
  - [2] Blau Y, Bar-On O, Hanein Y, Boag A, Scheuer J. Meta-hologram-based authentication scheme employing a speckle pattern fingerprint. *Opt Express* 2020; 8(6): 8924-8936. DOI: 10.1364/OE.388233.
  - [3] Zhang L, Zhou X, Wang D, Li N, Bai X, Wang Q. Multiple-image encryption based on optical scanning holography using orthogonal compressive sensing and random phase mask. *Opt Eng* 2020; 59(10): 102411. DOI: 10.1117/1.OE.59.10.102411.
  - [4] Yan A, Lu C, Yu J, Tang M, Dong J, Hu Z, Zhang H. Multiple-image encryption based on angular-multiplexing holography with quick response code and spiral phase keys. *Appl Opt* 2019; 58(34): G6-G10. DOI: 10.1364/AO.58.0000G6.
  - [5] Psaltis D, Farhat N. Optical information processing based on an associative-memory model of neural nets with thresholding and feedback. *Opt Lett* 1985; 10(2): 98-100.
  - [6] Sokolov VK, Shubnikov EI. Optical neural networks based on holographic correlators. *Quantum Electron* 1995; 25(10): 1032-1036.
  - [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] Amosov OS, Ivanov YS, Zhiganov SV. Human localization in video frames using a growing neural gas algorithm and fuzzy inference. *Computer Optics* 2017; 41(1): 46-58. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-46-58.
  - [9] Shimobaba T, Kuwata N, Homma M, Takahashi T, Nagahama Y, Sano M, Hasegawa S, Hirayama R, Kakue T, Shiraki A, Takada N, Ito T. Convolutional neural network-based data page classification for holographic memory. *Appl Opt* 2017; 56(26): 7327-7330. DOI: 10.1364/AO.56.007327.
  - [10] Agafonova YD, 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.
  - [11] Mikaelyan AL, Bobrinev VI, Sokolova LZ. Recording a great number of images by the hologram superposition method [In Russian]. *Dokl Akad Nauk SSSR* 1970; 191(4): 799-800.
  - [12] Benferhat S, Dubois D, Prade H. Nonmonotonic reasoning, conditional objects and possibility theory. *Artif Intell* 1997; 92(1-2): 259-276.
  - [13] Reiter R. A logic for default reasoning. *Artif Intell* 1980; 13(1-2): 81-132.
  - [14] Pavlov AV. On algebraic foundations of fourier holography. *Optics and Spectroscopy* 2001; 90(3): 452-457.
  - [15] Pavlov AV. On algebraic foundations of holographic paradigm in artificial intelligence: Algebra of Fourier-dual operations [In Russian]. *Proc of V-th Int Conf "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence"*. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2009; 1: 140-148.
  - [16] Pavlov AV. Algebra of Fourier-dual operations: Logic with Exclusion [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making* 2012; 3: 2-38.
  - [17] Zadeh L. Fuzzy sets. *Inf Control* 1965; 8(3): 338-353.
  - [18] 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.
- [19] Kuleshov AM, Shubnikov EI. Effect of the nonlinearity of the medium and spatial limitations of the filter on signal parameters in a holographic correlator. *Opt Spectrosc* 1986; 60(3): 369-372.
- [20] Shubnikov EI. Signal-to-noise ratio in correlation comparison of images. *Opt Spectrosc* 1987; 62(2): 268-271.
- [21] Shubnikov EI. Effect of additive and multiplicative noise in the correlation comparison of images. *Opt Spectrosc* 1987; 62(3): 389-392.
- [22] Shubnikov EI, Kuleshov AM. Effect of a change in scale and rotation of the image and a shift of the filter on the value of the signal in a holographic correlator. *Opt Spectrosc* 1983; 55(1): 94-96.
- [23] Kuleshov AM, Pavlov AV, Shubnikov EI. Effect of image inclination on the signal of a holographic correlator. *Opt Spectrosc* 1985; 59(2): 247-250.
- [24] Pavlov AV. Influence of geometric distortions on the images correlation. *Opt Spectrosc* 1991; 70(5): 1337-1341.
- [25] Kuleshov AM, Shubnikov EI, Smaeva SA. Optimal property of a matched holographic filter. *Opt Spectrosc* 1986; 60(6): 791-793.
- [26] Aleksandrina SA, Kuleshov AM. Effect of rejection of low spatial frequencies of the spectrum on the signal parameters in a holographic correlator. *Opt Spectrosc* 1990; 68(3): 381-383.
- [27] Pavlov AV. On the applicability of the linear regression model for describing Fourier holography. *Opt Spectrosc* 2005; 98(6): 949-953.
- [28] Yaglom AM. Correlation theory of stationary random functions [In Russian]. Leningrad: "Gidrometeoizdat" Publisher; 1981.
- [29] Doskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA, Golovastikov NA, Soifer VA. Resonant properties of composite structures consisting of several resonant diffraction gratings. *Opt Express* 2019; 27(18): 25814-25828. DOI: 10.1364/OE.27.025814.
- [30] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. A serially cascaded micro-ring resonator for simultaneous detection of multiple analytes. *Laser Phys* 2019; 29(4): 046208. DOI: 10.1088/1555-6611/ab0371.
- [31] Bezus EA, Doskolovich LD, Bykov DA, Soifer VA. Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances. *Opt Express* 2018; 26(19): 25814-25828. DOI: 10.1364/OE.26.025156.
- [32] Baizabal-Carvallo JF, Hallett M, Jankovic J. Pathogenesis and pathophysiology of functional (psychogenic) movement disorders // *Neurobiol Dis* 2019; 127: 32-44. DOI: 10.1016/j.nbd.2019.02.013.
- 

#### *Author's information*

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

---

*Received November 14, 2019. The final version – May 8, 2020.*

---