

Подход к аппроксимации передаточной характеристики и корреляционного отклика схемы голографии Фурье

© А.В. Павлов^{1,¶}, А.О. Гаугель¹, А.М. Алексеев²

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² ООО Завод лабораторной продукции „Фрейм“,
193230 Санкт-Петербург, Россия

¶ e-mail: avpavlov@itmo.ru

Поступила в редакцию 02.04.2022 г.

В окончательной редакции 05.05.2022 г.

Принята к публикации 09.06.2022 г.

Предложен подход к аппроксимации передаточной характеристики и отклика в +1-м порядке дифракции 4f-схемы голографии Фурье гауссовоподобной моделью применительно к обработке изображений со степенными пространственно-частотными спектрами мощности. Методом численного моделирования найдены связи параметров моделей аппроксимации и спектров эталонного изображения в зависимости от показателя степени эталонного спектра. Показаны погрешности аппроксимации и возможность их оптимизации в требуемом диапазоне пространственных частот, определяемом нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред. Правомочность подхода подтверждена сравнением результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: голография, преобразование Фурье, пространственно-частотный спектр, импульсный отклик, регистрирующие среды, экспозиционная характеристика.

DOI: 10.21883/OS.2022.09.53300.3478-22

Введение

В оптике широко используется приближение линейных систем, позволяющее описать устройство одной из двух, связанных преобразованием Фурье, равноправных характеристик — его передаточной функцией и/или импульсным откликом [1]. Поскольку непосредственно измеряются не комплекснозначные амплитуды, а интенсивности волновых полей, то на практике, применительно к классической 4f-схеме голографии Фурье (рис. 1), в качестве передаточной характеристики $H(\nu)$ обычно используется измеряемая в рабочем порядке дифракции зависимость локальной дифракционной эффективности $\eta(\nu)$ (по интенсивности) голограммы от пространственной частоты ν ,

$$H^p(\nu) = \eta(\nu) = \hat{H}^p S(\nu), \quad (1)$$

где верхний индекс p указывает порядок дифракции, в котором проводятся измерения, $S(\nu)$ — пространственно-частотный спектр мощности (спектр Винера) эталонного образа, использованного для записи голограммы, а \hat{H} — оператор голографической регистрирующей среды (ГРС), учитывающий условия записи голограммы и экспозиционные характеристики ГРС (ЭХ ГРС). Здесь мы используем термин передаточная характеристика, чтобы отличать (1) от комплекснозначной передаточной функции.

Вместо импульсного отклика из практических соображений часто используется автокорреляционная функция

(АКФ) записанного на голограмме эталона, формируемая в +1-м порядке дифракции в выходной плоскости Out при освещении голограммы эталонным спектром $S(\nu)$ (предъявлении во входной плоскости In эталонного образа) и связанная с передаточной характеристикой для +1-го порядка дифракции (1) преобразованием Фурье

$$\mathcal{R}(\xi) = \hat{F}H^{+1}(\nu), \quad (2)$$

где ξ — координата в задней фокальной плоскости второй фурье-преобразующей линзы L_2 — выходной плоскости схемы Out, \hat{F} — оператор преобразования Фурье. АКФ представляет собой дифракционно-ограниченное изображение точечного опорного источника, использованного при записи голограммы, т.е. функцию размытия точки.

Здесь и далее, где это возможно не в ущерб смыслу, мы принимаем допущение о разделимости переменных и для уменьшения размера выражений используем нотацию с функциями одной переменной. Рассмотрение проведем применительно к корреляционному отклику (2), т.е. к +1-му порядку дифракции, указание на который далее опустим.

Для реальной информации характерны пространственно-частотные спектры мощности, которые в статье для краткости будем называть просто спектрами, со степенным спадом [2–4]. Применительно к схеме голографии Фурье (рис. 1) передаточная характеристика (1) при степенных спектрах эталонных образов, записанных на голограмме, в ограниченном частотном диапазоне,

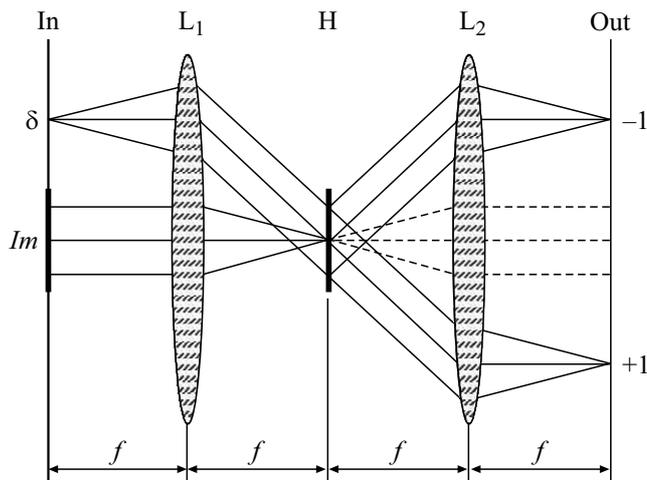


Рис. 1. $4f$ -схема голографии Фурье с плоским внеосевым опорным пучком: In и Out — плоскости входная и выходная соответственно; L_1 , L_2 — фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями f , H — голограмма, Im и δ — изображение и внеосевой точечный опорный источник соответственно, +1-й и -1-й — соответствующие порядки дифракции.

определяемом динамическим диапазоном ЭХ ГРС, часто может быть аппроксимирована экспоненциальными функциями, поскольку

а) частотно-контрастные характеристики трактов ввода информации как оптических, так и электронных обычно убывают с ростом частоты [1], т.е. тракты ввода информации играют роль дополнительных низкочастотных фильтров (НЧФ);

б) пространственное ограничение размера обрабатываемой информации апертурой кадрового окна ведет к ослаблению нулевых и низкочастотных компонент спектра как следствие свертки спектра с фурье-образом апертуры — „сглаживанию“ максимума записанного спектра относительно эталонного в области нулевых и низких пространственных частот;

в) ЭХ ГРС, представляемые зависимостью дифракционной эффективности от экспозиции, на участке прямой (возрастающей) зависимости обычно имеют сигмоидальный вид [5–7], обуславливающий дополнительную полосовую фильтрацию на голограмме — ослабление передаточной характеристики (1) относительно эталонного спектра в диапазонах как низких, так и высоких пространственных частот [4,8–10];

г) дополнительная фильтрация обусловлена также и форм-фактором голограммы [11], особо актуальным именно для голограмм Фурье и их частного случая — голографических согласованных фильтров, которые в реальности согласованы только в ограниченном диапазоне пространственных частот, определяемом как динамическим диапазоном ЭХ ГРС, так и условиями записи голограммы — выбором частоты равенства локальных амплитуд спектра и плоского опорного пучка [4,8–10]. При этом ограниченность динамического диапазона

ЭХ ГРС, обычно не превышающего два порядка, даже в случае низкочастотной голограммы, как правило, имеет следствием если и не режекцию, то очень сильное ослабление нулевой и крайне низких пространственных частот.

С точки зрения наглядности и удобства аналитического описания привлекательна аппроксимация передаточных характеристик функциями Гаусса, но реальные спектры характеризуются показателем степени аргумента (пространственной частоты), отличным от 2, вследствие чего гауссова модель в общем случае дает неадекватное описание передаточной характеристики и АКФ схемы. Использование же иных моделей затрудняет получение компактных и наглядных аналитических выражений.

Поиску удобной и адекватной модели аппроксимации отклика $4f$ -схемы посвящен ряд статей, применительно к корреляционной обработке изображений упомянем [4,8–10]. В этих работах применялись удобные и практически достаточные для задачи распознавания по критерию величины отношения сигнал/помеха [12] упрощенные модели аппроксимации. Например, в [8] передаточная характеристика (1) аппроксимирована треугольной Λ -функцией, и при аналитическом описании корреляционного отклика (2) использовался только один параметр — частота ее (Λ -функции) максимума, в первом приближении соответствующая частоте равенства локальных интенсивностей спектра эталонного образа и плоского опорного пучка при записи голограммы. Этот подход оказался эффективным в рамках задачи распознавания изображений, подвергаемых аффинным преобразованиям относительно эталонных.

Но для ряда реальных условий распознавания, например, при наличии проективных искажений распознаваемого образа относительно эталонного, простая и удобная модель [8] оказалась уже недостаточной — потребовалось полное описание и спектров, и голограмм [13], требующее существенных вычислительных ресурсов. Усложнение задач, решаемых методом голографии Фурье [14–22], в том числе и компьютерной [16–19], и соответствующее усложнение алгоритмов также актуализирует вопрос адекватной, наглядной и, что важно для практических применений [16–19], предполагающих работу в реальном времени, вычислительно незатратной аппроксимации.

В настоящей статье показаны возможности и ограничения аппроксимации передаточной характеристики и корреляционного отклика схемы голографии Фурье гауссовоподобной моделью в предположении записи голограммы при равенстве или превышении амплитудой опорного пучка локальной амплитуды пучка эталонного на нулевой пространственной частоте. Подход позволяет найти компромиссное решение дилеммы адекватность—наглядность аналитической модели и снизить требования к вычислительной мощности процессора в случае компьютерной реализации за счет использования аналитической модели.

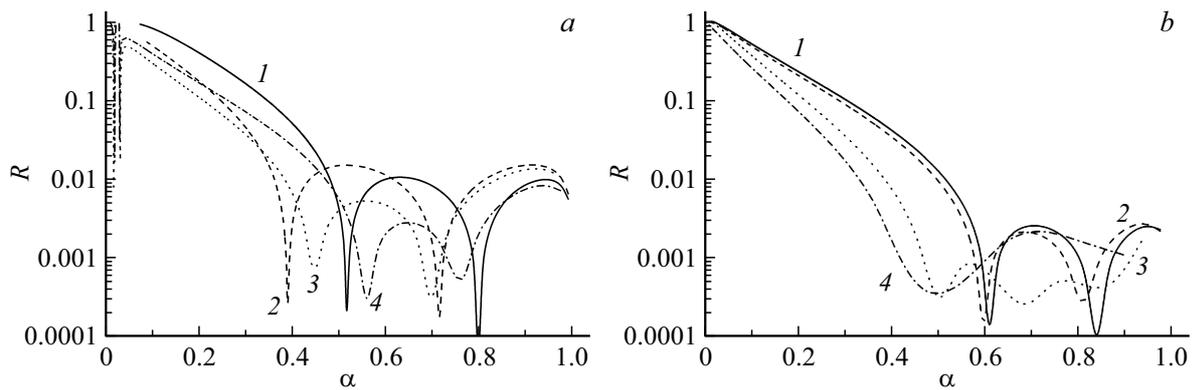


Рис. 2. Зависимости модуля относительной погрешности R аппроксимации моделью (4) от уровня спектра α : 1 — степенного спектра мощности $S(v) = v^{-1.1}$ (a), $S(v) = v^{-2.6}$ (b), 2 — с учетом НЧФ; 3 — с учетом сигмоидальной ЭХ ГРС, ФФ и НЧФ ($a: D = 0.895, v_{0.606} = 11.6, b: D = 1, 07, v_{0.606} = 6.57$); 4 — с учетом сигмоидальной ЭХ ГРС, ФФ и НЧФ ($a: D = 0.92, v_{0.606} = 11.8, b: D = 1.01, v_{0.606} = 5.551$).

1. Подход и модель аппроксимации

Представим передаточную характеристику схемы, т.е. записанный на голограмме эталонный спектр мощности $S(v)$ со степенным спадом, экспоненциальной моделью

$$H(v) = \exp\left(-\ln(\alpha)\left(\frac{-v}{v_\alpha}\right)^D\right), \quad (3)$$

где v — пространственная частота, $\eta(v)$ — зависимость локальной дифракционной эффективности голограммы (ДЭ) от пространственной частоты, D — показатель степени, v_α — параметр модели — частота, измеряемая по уровню

$$\alpha = \frac{H(v_\alpha)}{H(0)} = \frac{\eta(v_\alpha)}{\eta(0)},$$

т.е. определяемому как отношение значения передаточной характеристики (локальной ДЭ голограммы) на данной частоте v_α к ее максимальному значению (в рамках подхода — на нулевой частоте). Удобство этой модели в том, что параметр v_α не изменяется при изменении показателя степени D , а при $\alpha = 0.606$ и $D = 2$ имеем гауссову модель. Для простоты и наглядности далее рассмотрим частный вариант уровня $\alpha = 0.606$, т.е.

$$H(v) = \exp\left(\frac{-v^D}{2v_{0.606}^D}\right), \quad (4)$$

где $v_{0.606}$ — параметр, равный частоте, на которой локальная дифракционная эффективность голограммы $\eta(v) = \exp(0.5) = 0.606$ от ее максимального значения $\eta(0)$.

Применимость и ограничения такой аппроксимации иллюстрируют рис. 2, a, b, на которых в полулогарифмическом масштабе даны абсолютные значения относительных погрешностей аппроксимации моделью (4) передаточных характеристик с учетом упомянутых во введении факторов: низкочастотной фильтрации (НЧФ),

описываемой функцией Гаусса, сигмоидальных ЭХ ГРС (фотопластинки „ЛОИ2–653“, проявитель ГП2 [23]) и форм-фактора (ФФ), определяемого видностью картины интерференции спектра и плоского опорного пучка. Погрешности даны для двух степенных спектров: на рис. 2, a — $S(v) = v^{-1.1}$ — спутникового изображения зимнего ландшафта и на рис. 2, b — $S(v) = v^{-2.6}$ — реализации двумерного фрактального броуновского движения, адекватно моделирующего изображение облачного покрова [24]. В последнем случае спектральный максимум на нулевой частоте, на 2.4 порядка выделяющийся из остального спектра, при моделировании ослаблялся, как это имело место при записи реальных голограмм в силу ограниченности динамического диапазона ЭХ ГРС. Аргументом на рис. 2 взята относительная ДЭ голограммы

$$\alpha = \frac{H(v_\alpha)}{H(0)} = \frac{\eta(v_\alpha)}{\eta(0)},$$

т.е. рис. 2 показывает относительную погрешность аппроксимации формы передаточной характеристики схемы.

Как видно из рис. 2, с ростом показателя степени D погрешность аппроксимации уменьшается, а подбор параметров модели аппроксимации, физически обусловленных режимом записи голограммы и ее обработки, включая ЭХ ГРС, позволяет оптимизировать относительную погрешность в требуемом диапазоне интенсивностей спектра (локальной дифракционной эффективности голограммы $\eta(v)$ — передаточной характеристики схемы), связанном с диапазоном пространственных частот. Для аналоговых методов обработки традиционно считается допустимой относительная погрешность не более 0.1, этот уровень превышает только в высокочастотной области — экспоненциальная модель (4) дает заниженные сравнительно со степенной значения на высоких частотах.

Корреляционный отклик голографической схемы рис. 1, как фурье-образ функции (4), описывается аналогичным выражением только при $D = 2$, т.е. только для функции Гаусса $G(\nu)$

$$\hat{F}G(\nu) = \hat{F} \exp\left(\frac{-\nu^2}{2\nu_{0.606}^2}\right) = \exp\left(\frac{-\xi^2}{2\gamma^2}\right), \quad (5)$$

где ξ — координата в выходной (корреляционной) плоскости Out схемы рис. 1, $\gamma = \xi_{0.606} = \frac{1}{2\pi\nu_{0.606}}$ — обозначение параметра, используемое в статье только для параметра фурье-образа функции Гаусса. Если $D \neq 2$, то преобразование Фурье функции (4) при описании отклика схемы, в особенности с учетом дополнительной фильтрации, обусловленной ЭХ ГРС, и отличий спектра объектного (входного) от эталонного (записанного на голограмме), дает громоздкое и неудобное для практических целей выражение.

Примем для АКФ, т.е. фурье-образа функции (4), также гауссовоподобную модель аппроксимации

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(\xi) &= \hat{F}H^1(\nu) = \hat{F} \exp\left(\frac{-\nu^D}{2\nu_{0.606}^D}\right) \\ &\approx \exp\left(\frac{-\xi^{d(D)}}{2(\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606}))^{d(D)}}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $d(D)$ — показатель степени, зависящий от показателя степени D в модели спектра (4), и представим параметр $\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})$ следующим образом:

$$\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606}) = K_p(D)\gamma, \quad (7)$$

где

$$K_p(D) = \frac{\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})}{\gamma} \quad (8)$$

— функциональный коэффициент, задающий связь параметра $\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})$ для произвольного показателя степени аргумента D с параметром γ фурье-образа функции Гаусса (5).

Показатель степени $d(D)$ представим аналогичным образом

$$d(D) = K_d(D)D, \quad (9)$$

где $K_d(D)$ — функциональный коэффициент.

Аппроксимация (6), (7) практически актуальна в силу того, что параметр $\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})$ характеризует радиус автокорреляции эталонного образа, записанного на голограмме $r = \sqrt{2}\xi(D, \nu_{0.606})$, т.е. определяет корреляционную оценку информационной емкости образа — его обобщенную пространственную частоту [4,12]

$$\Omega = \frac{L}{r} = \frac{L}{\sqrt{2}\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})},$$

где L — размер эталонного образа при представлении его функцией одного аргумента. Для функции двух координат обобщенная пространственная частота определяется как отношение площадей образа и корреляции [12].

Вопрос правомочности аппроксимации (6) имеет ряд аспектов.

1. Точность представления параметра $\xi_{0.606}(D, \nu_{0.606})$ посредством (7) — этот вопрос актуален для задач, предполагающих однократное прохождение излучения от входной плоскости $4f$ -схемы голографии Фурье (рис. 1) к выходной, в которой и проводятся измерения: интенсивности отклика или радиуса корреляции [12].

2. Точность аппроксимации импульсного отклика (или ГМ АКФ) — этот вопрос в рамках нашего подхода сводится к аппроксимации показателя степени $d(D)$ посредством (9) и актуален для более сложных схем, в которых импульсный или корреляционный отклик используется для дальнейшей обработки, например, схем резонансной архитектуры, в том числе реализующих модели памяти [15,20,21] и немонотонной логики [22].

Ниже рассмотрим эти вопросы последовательно. Поскольку представления (7) и (9) математически из (6) не следуют, то и аналитическое нахождение функциональных коэффициентов $K_p(D)$ и $K_d(D)$ удобных выражений не дает. Поэтому ответы на эти вопросы найдены численно.

2. Аппроксимация корреляционного отклика

2.1. Аппроксимация параметра корреляционного отклика

Для нахождения функционального коэффициента $K_p(D)$ (8), связывающего параметры передаточной функции и корреляционного отклика — глобального максимума автокорреляционной функции (ГМ АКФ), было получено семейство зависимостей отношения параметров $\xi_{0.606}/\gamma$ (6) для ряда значений показателя степени D в диапазоне $D \in [0.5, 4]$ и диапазона значений параметра спектра амплитуд (4) $\nu_{0.606} \in [1, 100]$ пикселей при длине реализации спектра $N = 2^{18} = 262\,144$. Значения N и диапазон параметра спектра $\nu_{0.606}$ были выбраны из соображений обеспечения точности численного моделирования корреляционного отклика.

Были рассмотрены три модели аппроксимации, предварительно выбранные из соображений визуального сходства графического представления моделей с расчетными данными: сигмоидальная

$$K_{p_s}(D) = a_s(1 - \exp(-b_s(D - c_s)))^{e_s}, \quad (10)$$

логарифмическая (хорошее визуальное соответствие в диапазоне $D \in [1.0, 2.0]$)

$$K_{p_{\ln}}(D) = (\ln(D + a_{\ln}))^{c_{\ln}} + b_{\ln} \quad (11)$$

и гиперболическая (хорошее визуальное соответствие в диапазоне $D > 2.0$)

$$K_{p_{\text{hyp}}}(D) = 1.6\left(1 + \frac{1}{D}\right) + a_{\text{hyp}}, \quad (12)$$

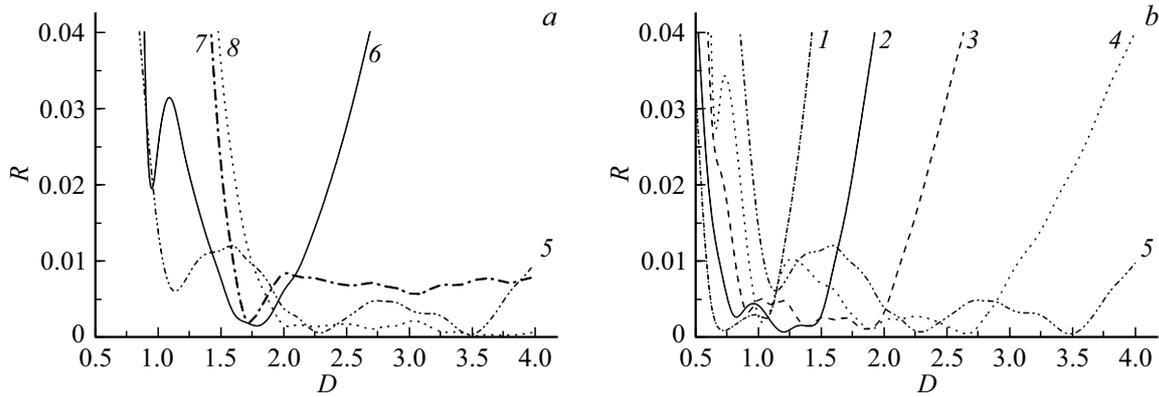


Рис. 3. (a, b) Зависимости относительной погрешности R аппроксимации коэффициента $K_p(D)$ от показателя степени D : модель (10) для диапазонов $[0.5, 1.0]$ (1), $[0.5, 1.5]$ (2), $[0.5, 2.0]$ (3), $[0.5, 3.0]$ (4), $[0.5, 4.0]$ (5); модель (11) для диапазонов $[1.0, 2.0]$ (6), модель (12) для диапазона $[2.0, 3.0]$ (7), $[3.0, 4.0]$ (8).

где a, b, c и e — параметры, буквенные индексы при них указывают на модель. Подбор параметров проводился по критерию минимума среднего квадрата отклонения (СКО) значения аппроксимации результатов численных экспериментов. В табл. 1 приведены значения СКО для этих моделей в зависимости от диапазона аппроксимации.

Как видно из таблицы, сужение диапазона аппроксимации ведет к росту ее точности, при этом сигмоидальная модель (10) дает наилучшую аппроксимацию по критерию минимума СКО в более широких диапазонах, чем модели (11) и (12). Поскольку СКО является интегральной по всему диапазону оценкой, то на рис. 3, a, b приведены зависимости относительных погрешностей аппроксимации от показателя степени D , позволяющие составить более детальное представление о погрешностях аппроксимации.

Можно видеть, что модель (10) дает существенно более точную аппроксимацию как в узких, так и в широких диапазонах. При этом отметим, что в соответствующих диапазонах все модели дают погрешность, в целом более чем на порядок меньшую традиционно принимаемого для аналоговых вычислений порога 0.1.

2.2. Аппроксимация формы корреляционного отклика

Нахождение зависимости $K_d(D)$ проведено по критерию минимума СКО модели аппроксимации (6) от фактического корреляционного отклика в диапазоне значений $\xi \in [0, \xi_{max}]$, где ξ_{max} определялась по трем критериям:

- а) представления 99.5% энергии спектра применительно к $D = 2$ [1];
- б) динамическому диапазону измерения и соответственно аппроксимации АКФ 1-го порядка;
- в) динамическому диапазону измерения АКФ 2-го порядка.

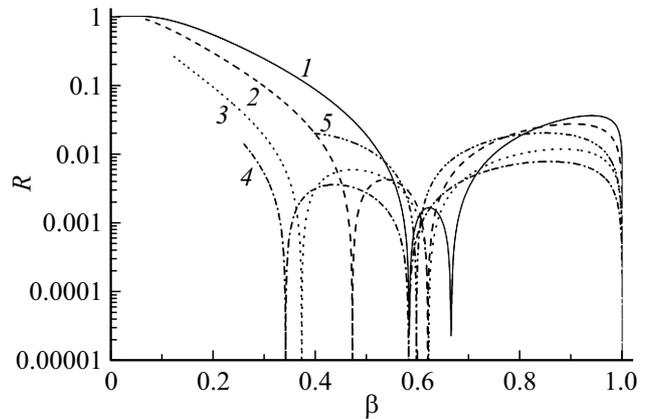


Рис. 4. Относительные погрешности аппроксимации формы ГМ АКФ при выборе диапазона аппроксимации из условия представления 99.5% энергии спектра применительно к $D = 2$: $D = 0.5$ (1), 1.0 (2), 1.5 (3), 2.5 (4), 4.0 (5).

Полученные в численных экспериментах зависимости K_d были аппроксимированы моделью

$$K_d(D) = A - B_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-D}{C_1}\right) \right) - B_2 \left(1 - \exp\left(\frac{-D}{C_2}\right) \right), \tag{13}$$

где A, B_1, B_2, C_1 и C_2 — параметры; их значения и СКО аппроксимации для каждого из вариантов приведены в табл. 2.

На рис. 4 в полулогарифмическом масштабе приведены относительные погрешности аппроксимации формы ГМ АКФ для варианта а), где $\beta = \frac{\mathcal{R}(\xi)}{\mathcal{R}(0)}$ — относительная амплитуда ГМ АКФ. Для б) и в) зависимости имели аналогичный вид, но с расширением диапазона аппроксимации относительная погрешность аппроксимации в целом возрастала.

Таблица 1. СКО и значения параметров аппроксимации $K_p(D)$ для разных диапазонов D

Диапазон D	Модель (10)		Модель (11) $a_{ln} = 0.2, b_{ln} = 0.2$		Модель (12)	
	параметры	СКО	параметр c_{ln}	СКО	параметр a_{hyp}	СКО
[0.5,4.0]	$a_s = 1.44712$ $b_s = 0.74342$ $c_s = 0.46575$ $e_s = 1.18905$	0.0076	0.85	0.081	0.2	0.328
[1,4.0]			0.85	0.0765	0.21	0.047
[1,3.5]			0.85	0.053	0.21	0.051
[0.5,3.0]	$a_s = 1.37323$ $b_s = 0.7904$ $c_s = 0.4385$ $e_s = 1.29348$	0.0052				
[1,3.0]			0.9	0.032	0.21	0.057
[1,2.5]			0.9	0.014	0.21	0.066
[0.5,2.0]	$a_s = 1.222$ $b_s = 0.889$ $c_s = 0.393$ $e_s = 1.48578$	0.00286				
[1,2.0]			0.9	0.005	0.21	0.08
[0.5,1.5]	$a_s = 1.056$ $b_s = 1.0073$ $c_s = 0.35825$ $e_s = 1.6775$	0.00161				
[0.5,1.0]	$a_s = 0.8592$ $b_s = 1.17409$ $c_s = 0.33101$ $e_s = 1.87929$	0.00095				
[2.0,4.0]	$a_s = 1.619$ $b_s = 1.00332$ $c_s = 0.63857$ $e_s = 1.05991$	0.0006				
[3.0,4.0]	$a_s = 1.615$ $b_s = 0.67154$ $c_s = 0.44753$ $e_s = 0.80415$	0.00046	0.6	0.012	0.2	0.002
[2.0,3.0]	$a_s = 1.619$ $b_s = 1.00332$ $c_s = 0.63857$ $e_s = 1.05991$	0.00049	0.7	0.005	0.2	0.003

3. Экспериментальная проверка

Для экспериментального подтверждения правомочности изложенного подхода в схеме рис. 1 была записана серия фурье-голограмм изображения двумерного фрактального броуновского движения (ДФБД), спектр которого описывается моделью [23]

$$S(\nu) = \nu^{2\mathcal{H}+1},$$

где $\mathcal{H} \in [0, 1]$ — параметр Херста. В качестве эталона при записи голограмм использована приведенная на рис. 5 реализация ДФБД со значением параметра Херста $\mathcal{H} = 0.8$, что соответствует показателю степени спектра мощности $D = 2.6$. Голограммы записывались при разных отношениях амплитуд сигнального и опорного пучков, т.е. имели разный форм-фактор и были согласованы в разных диапазонах пространственных

Таблица 2. Значения параметров модели аппроксимации (13) и СКО

Вариант выбора диапазона	Значения параметров					СКО аппроксимации
	A	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	
а)	4.79749	2.59236	1.8393	0.25871	1.8771	0.0027
б)	5.91143	4.4454	1.85496	0.43043	6.26752	0.02196
в)	8.92392	7.5411	64.29551	0.20088	313.6806	0.00976

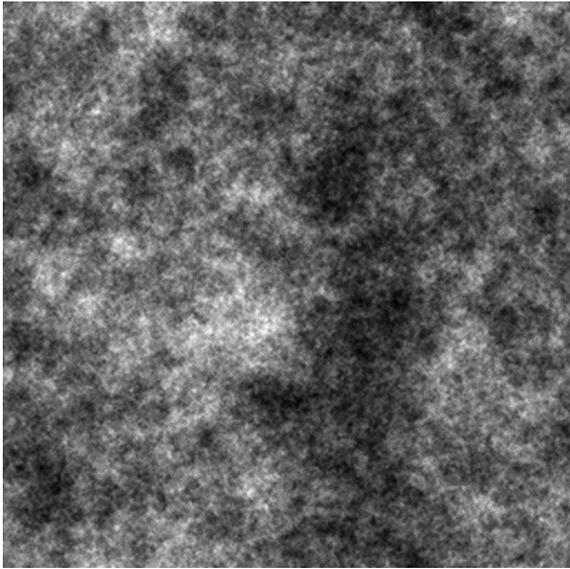


Рис. 5. Реализация двумерного фрактального броуновского движения со значением параметра Херста $\mathcal{H} = 0.8$.

фильтрами Гаусса с разными значениями параметра фильтра образы. Измерения корреляционных откликов проводились диссектором ЛИ-602, характеризующимся широким динамическим диапазоном.

На рис. 6 показаны три примера откликов схемы рис. 1: 1 и 2 — отклики на эталонное изображение рис. 5 двух голограмм из серии, которые можно определить как высокочастотную (1) и низкочастотную (2), измеренные значения параметра ГМ АКФ $\xi_{0.606} = 0.175$ мм и $\xi_{0.606} = 0.94$ мм соответственно, а также (3) — отклик высокочастотной голограммы на изображение, подвергнутое низкочастотной фильтрации фильтром Гаусса, измеренное значение параметра отклика $\xi_{0.606} = 0.5$ мм, коэффициент корреляции — 0.128. Экспериментально измеренные отклики (точки) были аппроксимированы моделью (6) (линии).

Рисунок 6 показывает хорошее соответствие гауссово-подобной модели (6) аппроксимации корреляционного отклика (ГМ АКФ) экспериментальным данным при предъявлении схеме как эталонных (кривые 1 и 2), так и размытых низкочастотным фильтром образов (кривая 3).

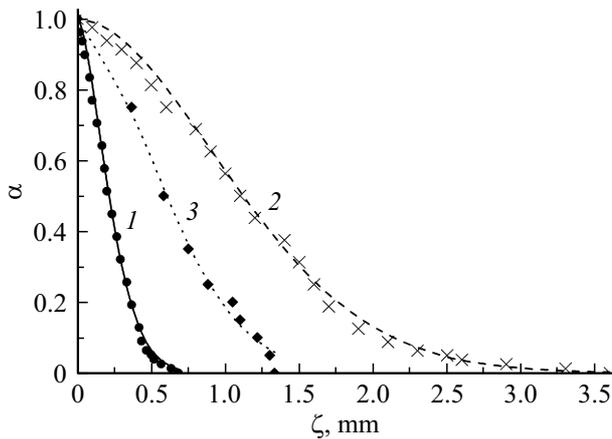


Рис. 6. Глобальные максимумы автокорреляционных функций: 1 — высокочастотная голограмма, 2 — низкочастотная голограмма, 3 — отклик высокочастотной голограммы на эталон, подвергнутый НЧФ; точки — эксперимент, линии — аппроксимация (6); СКО аппроксимации: 1 — $4.35 \cdot 10^{-4}$, 2 — $5.36 \cdot 10^{-4}$, 3 — $7.214 \cdot 10^{-4}$ (3).

частот. Записанным голограммам предъявлялись как эталонные, так и профильтрованные низкочастотными

Заключение

Таким образом, при обработке схемой голографии Фурье информации со степенными спектрами в силу ограниченности динамического диапазона голографических регистрирующих сред передаточная характеристика и автокорреляционная функция могут быть с приемлемой для практических целей точностью аппроксимированы гауссово-подобной моделью. Экспоненциальные модели спектров характеризуются существенным по сравнению со степенными снижением удельного веса высокочастотных компонент, но на практике этот фактор в значительной степени нивелируется как низкочастотной фильтрацией в трактах ввода информации, так и нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред, ведущей к ограниченности частотного диапазона передаточной характеристики. В ряде случаев ограничение частотного диапазона необходимо уже из условий задачи, например, для обеспечения требуемого отношения сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений [12]. Подбор параметров модели аппроксимации позволяет оптимизировать модель для требуемого частотного диапазона.

В ряде практических задач для ввода в процессор компьютерно-синтезированных голографических фильтров используются пространственно-временные модуляторы света с выраженной дискретной структурой и ограниченным количеством уровней квантования [18,19]. В этом случае изложенный подход позволяет оптимизировать требования к вычислительной мощности и объему памяти для расчета фильтра.

Информация о вкладе авторов

Вклад А.В. Павлова заключается в постановке задачи, формировании подхода, разработке программного обеспечения, планировании и проведении численных и натуральных экспериментов, обработке их результатов, написании статьи, вклад А.О. Гаугеля состоит в участии в численном моделировании, вклад А.М. Алексеева — в участии в натуральных экспериментах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.М. Мирошников. *Теоретические основы оптико-электронных приборов*. (Машиностроение, Ленинград, 1977), 600 с.
- [2] А.М. Яглом. *Корреляционная теория стационарных случайных функций*. (Гидрометеоздат, Ленинград, 1981), 280 с.
- [3] А.Е. Алтынов, В.В. Грузинов, И.В. Мишин. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, (1), 34 (2017).
- [4] А.М. Кулешов, Е.И. Шубников, С.А. Смаева. Опт. и спектр., **60** (6), 1273 (1986). [A.M. Kuleshov, E.I. Shubnikov, S.A. Smaeva. Opt. Spectrosc., **60** (6), 791 (1986)].
- [5] В.А. Барачевский. Опт. и спектр., **124** (3), 371 (2018) [V.A. Barachevsky. Opt. Spectrosc., **124** (3), 373 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.03.45659.238-17].
- [6] Л.П. Амосова, Н.И. Плетнева, А.Н. Чайка. Оптический журнал, **72** (6), 57 (2005) [L.P. Amosova, N.I. Pletneva, A.N. Chaika, J. Optical Technology, **72** (6), 469 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000469].
- [7] Л.П. Амосова, А.Н. Чайка. Письма в ЖТФ, **33** (6), 57 (2007) [L.P. Amosova, A.N. Chaika, Technical Physics Lett., **33** (6), 255 (2007). DOI: 10.1134/S1063785007030200].
- [8] Е.И. Шубников, А.М. Кулешов, Опт. и спектр., **55** (1), 161 (1983). [E.I. Shubnikov, A.M. Kuleshov. Opt. Spectrosc., **55** (1), 94 (1983)].
- [9] А.М. Кулешов, Е.И. Шубников. Опт. и спектр., **60** (3), 606 (1986) [A.M. Kuleshov, E.I. Shubnikov. Opt. Spectrosc., **60** (3), 369 (1986)].
- [10] С.А. Александрина, А.М. Кулешов. Опт. и спектр., **68** (3), 652 (1990).
- [11] С.А. Шойдин, М.С. Ковалев. Опт. и спектр., **128** (7), 885 (2020). [S.A. Shoydin, M.S. Kovalev. Opt. Spectrosc., **128** (7), 885 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.07.49557.108-20].
- [12] Е.И. Шубников. Опт. и спектр., **62** (2), 450 (1987). [E.I. Shubnikov. Opt. Spectrosc., **62** (2), 268 (1987)].
- [13] А.В. Павлов. Опт. и спектр., **78** (1), 152 (1995) [A.V. Pavlov. Opt. Spectrosc., **78** (1), 135 (1995)].
- [14] В.В. Орлов. Квант. электрон., **47** (8), 773 (2017). [V.V. Orlov. Quantum Electronics, **47** (8), 773 (2017). DOI: 10.1070/QEL16337].
- [15] А.В. Павлов, В.В. Орлов. Квант. электрон., **49** (3), 246 (2019). [A.V. Pavlov, V.V. Orlov. Quantum Electronics, **49** (3), 246 (2019). DOI: 10.1070/QEL16748].
- [16] П.А. Ручка, Н.М. Вереникина, И.В. Гриценко, Е.Ю. Злоказов, М.С. Ковалев, Г.К. Красин, С.Б. Одинокоев, Н.Г. Степуро. Опт. и спектр., **127** (4), 563 (2019). [P.A. Ruchka, N. M. Verenikina, I.V. Gritsenko, E.Yu. Zlokazov, M.S. Kovalev, G.K. Krasin, S.B. Odinokov, N.G. Stsepuro. Opt. Spectrosc., **127**, 618 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.10.48358.172-19].
- [17] М.С. Ковалев, Г.К. Красин, С.Б. Одинокоев, А.В. Солмашенко, Е.Ю. Злоказов. Optics Express, **27** (2), 1563 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.001563
- [18] Е.Ю. Злоказов. Квант. электрон., **50** (7), 643 (2020). [E.Yu. Zlokazov. Quantum Electronics, **50** (7), 643 (2020). DOI: 10.1070/QEL17291].
- [19] Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, В.В. Краснов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черемхин // Квант. электрон., **50** (7), 667 (2020). [N.N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, R.S. Starikov, P.A. Cheremkhin. Quantum Electronics, **50** (7), 667 (2020). DOI: 10.1070/QEL17295].
- [20] S. Rothe, P. Daferner, S. Heide, D. Krause, F. Schmieder, N. Koukourakis, J.W. Czarske. Optics Express, **29** (23), 37602 (2021). DOI: 10.1364/OE.434842
- [21] H.J. Mager, O. Wess, W. Waidelich. Opt. Commun., **9** (2), 156 (1973). DOI: 10.1016/0030-4018(73)90248-4
- [22] А.В. Павлов. Компьютерная оптика, **44** (5), 728 (2020). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668
- [23] И.Р. Протас, В.И. Михайлова, Ю.А. Кракау, Г.М. Шепетуха, И.В. Баранова, Ю.Е. Усанов, Л.В. Мациевич, Е.И. Михайлова. *Материалы Шестой всесоюзной школы по голографии*. Ереван, 11–17 февраля 1974 г. С. 529–531. URL: <http://bsfp.media-security.ru/school6/31.htm>
- [24] Р.М. Кроновер. *Фрактали и хаос в динамических системах. Основы теории. Перевод с англ.* (Постмаркет, Москва, 2000). 352 с. [Richard M. Crownover. *Introduction to Chaos and Fractals*. (Jones and Bartlett Publishers, Inc., Boston, London, 1995)].