

04

Моделирование эквивалентной передаточной функции и импульсного отклика схемы голографии Фурье для высокочастотных голограмм

© А.В. Павлов, А.О. Гаугель

Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: avpavlov@itmo.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

В окончательной редакции 01.04.2023 г.

Принята к публикации 01.04.2023 г.

Предложен и обоснован подход к моделированию передаточной функции и аппроксимации импульсного отклика в +1-м порядке дифракции $4f$ -схемы голографии Фурье моделью „разность функций Гаусса“ при использовании высокочастотных голограмм, характеризующихся наличием инверсного участка зависимости локальной дифракционной эффективности от пространственной частоты в диапазоне частот ниже частоты равенства локальных амплитуд эталонного спектра и опорного пучка. Показана целесообразность использования при реализации моделей обработки, предполагающих работу только с глобальным максимумом отклика схемы, передаточной функции, эквивалентной по критерию минимума среднего квадрата ошибки импульсного отклика, как обеспечивающей более точную аппроксимацию импульсного отклика сравнительно с аппроксимацией непосредственно передаточной функции. Правомочность подхода подтверждена сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: голография, преобразование Фурье, передаточная функция, импульсный отклик, голографические регистрирующие среды, экспозиционная характеристика.

DOI: 10.21883/OS.2023.07.56127.4540-23

Введение

При описании и моделировании устройств в рамках приближения линейных систем традиционно используются две, связанные преобразованием Фурье, характеристики: передаточная функция и импульсный отклик. Применительно к классической $4f$ -схеме голографии Фурье с плоским внеосевым опорным пучком (рис. 1) в качестве первой из них, которую обозначим $H^P(\nu)$, на практике используется зависимость локальной дифракционной эффективности (ДЭ) по амплитуде $\eta(\nu)$ в требуемом порядке дифракции p от пространственной частоты ν , связанной с пространственной координатой в плоскости голограммы x выражением $x = \lambda f \nu$, где λ — длина волны, f — фокусное расстояние первой фурье-преобразующей линзы L_1 . В рамках данной статьи нас интересует только совпадающий с направлением распространения опорного пучка +1-й порядок дифракции, в котором в выходной плоскости Out формируется поле, описываемое функцией взаимной корреляции объектного (предъявляемого во входной плоскости In) и эталонного полей, поэтому указание на порядок дифракции p опустим и передаточную функцию схемы голографии Фурье рис. 1 для +1-го порядка дифракции представим в виде

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

где $S(\nu)$ — пространственно-частотный спектр амплитуд эталонного поля, \hat{H} — оператор, учитывающий

условия записи голограммы (частоту равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков ν_0) и экспозиционные характеристики голографической регистрирующей среды (ЭХ ГРС). Здесь и далее, где это возможно не в ущерб адекватности описания, для уменьшения размера выражений мы используем допущение о разделимости переменных и соответственно нотации с функциями одной переменной.

Импульсный отклик линейной системы $h(\xi)$, где ξ — координата в выходной плоскости, определяемый как отклик системы на дельта-функцию — точечный источник в оптике — связан с передаточной функцией преобразованием Фурье [1]. В голографической практике используется отклик схемы рис. 1 в +1-м порядке дифракции в выходной плоскости Out при предъявлении во входной плоскости In эталонного поля — автокорреляционная функция (АКФ) эталона с учетом дополнительной фильтрации на голограмме, обусловленной нелинейностью ЭХ ГРС, режимом обработки (проявления) и условиями записи голограммы, в первую очередь — выбором частоты равенства локальных амплитуд эталонного спектра и плоского опорного пучка [2–12], а также выбором рабочего участка динамического диапазона ЭХ ГРС

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

где ξ — координата в задней фокальной плоскости второй фурье-преобразующей линзы L_2 (выходной плоскости схемы Out), \hat{F} — оператор преобразования Фурье.

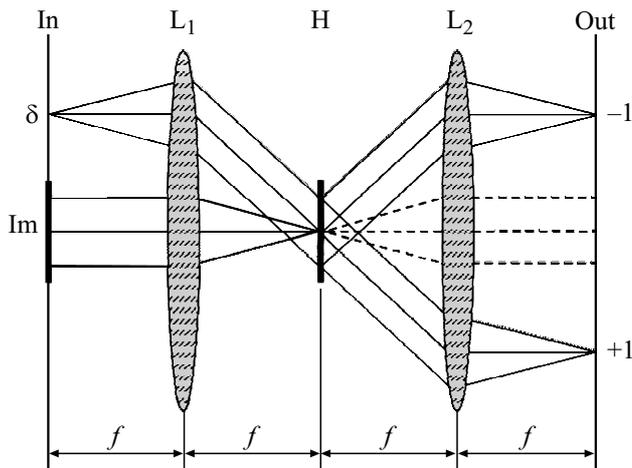


Рис. 1. $4f$ -схема голографии Фурье с плоским внесосевым опорным пучком: In и Out — плоскости входная и выходная соответственно; L_1, L_2 — фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями f , H — голограмма, Im и δ — изображение и внесосевой точечный опорный источник соответственно, +1-й и -1-й —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

Этот отклик есть дифракционно ограниченное изображение точечного опорного источника δ , использованного при записи голограммы, т.е. представляет функцию размытия точки. Такое определение импульсного отклика, как и передаточной функции (1), специфично для голографии и отличается от его классического определения как отклика на импульс (точечный источник в оптике) на входе системы, так как при предъявлении во входной плоскости In точечного источника голографическая схема восстановит в выходной плоскости Out в +1-порядке дифракции не дифракционно ограниченное изображение точки, представленное глобальным максимумом АКФ (2), а эталонное поле, использованное для записи голограммы Фурье.

Характерные для реальной информации пространственно-частотные спектры со степенным спадом [13,14] с учетом нелинейности ЭХ ГРС [3–5] и формфактора голограммы [10] зачастую неудобны с точки зрения простоты и наглядности аналитического описания. Поэтому вопросу аппроксимации этих характеристик схемы голографии Фурье посвящен ряд работ [3,7–9,15,16], в которых модель аппроксимации согласована с моделью обработки, в частности, с измеряемой характеристикой отклика схемы — его мощностью, отношением сигнал-помеха и/или радиусом корреляции, являющимся фундаментальной информационной характеристикой обрабатываемого поля [17,18]. В ряде задач, например, при реализации моделей обработки информации, основанных на нечетко-значимых логиках [19–21], в выходной плоскости Out измеряется именно радиус корреляционного отклика (2) по заданному уровню β (символ α в настоящей статье, как и в [16], используем для обозначения

уровня измерения ДЭ и передаточной функции $H(\nu)$ в плоскости голограммы).

Важный аспект задачи аппроксимации экспериментально измеренных характеристик (1) и (2) — удобство модели аппроксимации как с точки зрения простоты и наглядности, так и в плане минимизации требований к вычислительным ресурсам применительно к цифровым методам голографии [22–24]. В статье [16] показана возможность аппроксимации передаточной характеристики схемы рис. 1 экспоненциальными функциями для случая записи низкочастотных голограмм, т.е. голограмм, при записи которых частота равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков $\nu_0 = 0$, поскольку амплитуда опорного пучка равна или больше значения спектра амплитуд эталона на нулевой пространственной частоте. Как результат, у таких голограмм максимум дифракционной эффективности (ДЭ), он же — максимум передаточной функции (1), локализован на нулевой пространственной частоте.

Если частота равенства локальных амплитуд опорного пучка и спектра амплитуд ν_0 отлична от нуля, то и максимум передаточной функции $H(\nu)$ локализован в области этой частоты ν_0 , а в диапазоне частот $\nu < \nu_0$ обычно имеется инверсная относительно спектра эталона зависимость ДЭ от частоты $\eta(\nu): \frac{1}{S(\nu)}$. Для таких голограмм, называемых высокочастотными, в работе [15] предложена аппроксимация суммой двух симметрично смещенных функций Гаусса, величина сдвига функций соответствует частоте максимума ДЭ голограммы.

Подход [15] удобен с точки зрения аналитического описания и численного моделирования, но обладает рядом практически значимых ограничений, обусловленных недостаточной гибкостью модели, так как в ней имеются только два параметра для согласования с экспериментальными данными $\eta(\nu)$: частота равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков ν_0 и параметр функции Гаусса $\nu_{0.606}$. В частности, этот подход не всегда позволяет адекватно аппроксимировать передаточную функцию в двух важных областях частотного диапазона: инверсной зависимости ДЭ в низкочастотном диапазоне и высокочастотной.

Значительный „провал“ ДЭ в области низких частот, вплоть до их режекции, возникает вследствие ограниченности динамического диапазона ЭХ ГРС [6–8] при выборе достаточно высокой частоты равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков ν_0 [2,9]. Учет в модели инверсного участка зависимости $\eta(\nu)$ важен как в случае реализации динамических моделей обработки информации, т.е. для голографических схем резонансной архитектуры, поскольку сильное ослабление низких пространственных частот ведет к изменению типа динамики системы с конвергентного на режим с перемежаемостью или к перестройке устойчивого типа решения [20,21], так и в плане изменения модели АКФ (импульсного отклика системы) — росту и последующему доминированию боковых максимумов АКФ [21].

Высокочастотный диапазон зависимости $\eta(\nu)$ подлежит учету в модели, поскольку он дает основной вклад в формирование глобального максимума автокорреляционной функции. Ход зависимости $\eta(\nu)$ в этой области определяется не только эталонным спектром, но и режимами записи голограммы и проявления ГРС. В частности, при записи высокочастотных голограмм при условии $\nu_0 \gg 0$ высокочастотные компоненты спектра попадают в диапазон экспозиционной характеристики ГРС с максимальным коэффициентом передачи, в результате имеет место усиление удельного веса записанных на голограмме высокочастотных компонент относительно эталонного спектра.

Существенно влияет на вид зависимости $\eta(\nu)$ также выбор рабочего участка динамического диапазона ЭХ ГРС. В частности, если локальная экспозиция на частоте равенства локальных амплитуд эталонного спектра и опорного пучка ν_0 соответствует поддиапазону насыщения ЭХ ГРС, то в некоторой окрестности ν_0 происходит уплощение зависимости $\eta(\nu)$ — вместо явно выраженного максимума $\eta(\nu_0)$ имеет место плато, ширина которого определяется локальной переэкспозицией.

Поэтому адекватная аппроксимация передаточной функции схемы голографии Фурье одной удобной функцией для всех условий записи голограмм (вариантов выбора значения ν_0 и проявления) крайне проблематична. Но есть ряд задач, в которых важен только глобальный максимум отклика, его форма. Например, при реализации нечетко-значимых логик измеряемой характеристикой отклика является радиус корреляции по заданному уровню [19]. Для такого ограниченно-го класса задач в настоящей статье, в развитие работ [15,16], предложен и обоснован подход к моделированию передаточной функции схемы при сильном, вплоть до режекции, ослаблении низких пространственных частот на голограмме, функцией DOG (Difference of Gaussians), широко используемой в ряде практических применений: вейвлет-анализе [25], цифровой обработке изображений [26], голографических схемах улавливания частиц [27] и т.д.

1. Подход и модель аппроксимации

Представим передаточную характеристику (1) схемы рис. 1 разностью двух экспоненциальных функций

$$H(\nu) = H_1(\nu) - H_2(\nu) = a_1 \exp\left(-\ln(\alpha) \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{D_1}\right) - a_2 \exp\left(-\ln(\alpha) \left(\frac{\nu}{\nu_2}\right)^{D_2}\right), \quad (3)$$

где D_1 и D_2 — показатели степени, ν_1 и ν_2 — параметры модели — частоты, измеряемые по уровню

$$\alpha_i = \frac{H_i(\nu_\alpha)}{H_i(0)}.$$

Аппроксимирующая функция (АФ) (3) представляет собой развитие пригодной для аппроксимации передаточной характеристики в случае низкочастотных голограмм модели [16] добавлением второго члена (вычитаемого), необходимого для представления инверсного участка зависимости ДЭ от частоты в диапазоне $[0, \nu_0]$. В модель (3) входят шесть параметров и для нахождения их значений может быть применен как численный подход, представленный в [15], так и аналитический. Для аналитического нахождения параметров наложим на аппроксимирующую функцию (АФ) (3) следующие условия в плане согласования $H(\nu)$ с экспериментальными данными $\eta(\nu)$:

А) неотрицательности в диапазоне аппроксимации

$$\nu \in [0, \nu_{\max}]: \quad H(\nu) \geq 0, \quad (4)$$

где ν_{\max} — определяемая ЭХ ГРС или апертурой в фурье-плоскости H верхняя граница частотного диапазона, записанного на голограмме;

Б) локализации:

Б.1) максимума передаточной характеристики

$$\frac{dH(\nu_0)}{d\nu} = 0, \quad (5)$$

где ν_0 — частота локализации максимума зависимости ДЭ от частоты $\eta(\nu)$, в первом приближении, достаточном для задачи аппроксимации, совпадающая с частотой равенства локальных амплитуд опорного и сигнального пучков при записи голограммы [3,7];

Б.2) минимума ДЭ на нулевой частоте

$$\frac{d^2H(0)}{d\nu^2} > 0; \quad (6)$$

В) нормировки максимума передаточной характеристики на частоте максимума ДЭ ν_0 :

$$\max(H(\nu_0)) = \eta(\nu_0) = 1; \quad (7)$$

Г) совпадения значений АФ (3) и экспериментально измеренной ДЭ в точке $\nu = 0$

$$H(0) = \eta(0) = a_1 - a_2; \quad (8)$$

Д) пересечения экспериментальной зависимости ДЭ и АФ на заданном уровне α

$$H(\nu_\alpha) = \eta(\nu_\alpha). \quad (9)$$

Нас интересует вариант сильного ослабления низких частот, т.е. учета в модели инверсного спада ДЭ в области $\nu < \nu_0$, поэтому имеет смысл выбор $\alpha > \eta(0)$. Отсюда следует требование на выполнение условия (9) на двух частотах: $\nu_{\alpha low} < \nu_0$ в инверсном и $\nu_{\alpha Match} > \nu_0$ в согласованном (в некотором приближении) со спектром эталона $S(\nu)$ диапазонах зависимости ДЭ от частоты $\eta(\nu)$.

В результате имеем 7 условий, т.е. их избыточность, так как АФ (3) включает только 6 параметров. Вместе

с тем при аналитическом моделировании функция (3) в общем виде дает весьма громоздкие и неудобные выражения. Поэтому практический интерес представляет „удобный“ вариант $\alpha = 0.606$ и $D = 2$, т.е. функция DOG

$$H(v) = \mathcal{J}_1(v) - \mathcal{J}_2(v) = a_1 \exp\left(-0.5\left(\frac{v}{v_1}\right)^2\right) - a_2 \exp\left(-0.5\left(\frac{v}{v_2}\right)^2\right). \quad (10)$$

Функция DOG привлекательна как с точки зрения уменьшения размерности задачи (четыре параметра), что важно при использовании численных методов, так и в плане аналитического определения приближенных значений параметров, которые при необходимости могут быть затем уточнены или скорректированы численно.

Поскольку $v_{almv} < v_{aMatch}$, а из свойства неотрицательности ДЭ (4) и условия (8) следует $a_1 > a_2$, то анализ корней уравнения, решаемого относительно параметра v_1 при подстановке в условие (7) функции DOG (10) показывает, что в приближении, допустимом с учетом обычного требования к точности аналоговых методов, согласованный участок АФ в некоторой окрестности α может быть описан только первым слагаемым (10), т.е.

$$\alpha \approx a_1 \exp\left(-0.5\left(\frac{v_{aMatch}}{v_1}\right)^2\right).$$

Отсюда следует приближенная оценка параметра первого слагаемого в АФ (10)

$$v_1 \approx v_{aMatch} \sqrt{\frac{1}{2(\ln(a_1) - \ln(\alpha))}} \Big|_{\alpha=0.606} = v_{0.606Match} \sqrt{\frac{1}{1 + 2\ln(a_1)}}, \quad (11)$$

откуда получим приближенную оценку значения параметра a_1

$$a_1 \approx 1 - \frac{v_0^2}{v_{aMatch}^2} \sqrt{\exp\left(0.5 \frac{v_0^2}{v_{aMatch}^2}\right)}. \quad (12)$$

Значение параметра a_2 находится подстановкой (12) в условие (8).

Величину параметра v_2 получим из условия (9) для v_{almv}

$$v_2 = \frac{v_0 l m v}{\sqrt{-2 \ln\left(\frac{a_1}{a_2} \exp\left(-0.5 \frac{v_0^2 l m v}{v_1^2}\right) - \frac{\alpha}{a_2}\right)}}. \quad (13)$$

Таким образом, имеем приближенные значения всех четырех параметров АФ (10) для аппроксимации зависимости $\eta(v)$ в диапазоне от нулевой до некоторой частоты, большей v_0 .

Но достаточно очевидно, что данный подход не позволяет в полной мере отразить особенности записи и обработки голограмм с учетом ЭХ ГРС — ход зависимости $\eta(v)$ как в высокочастотном диапазоне, так и в области частоты равенства локальных амплитуд эталонного спектра и опорного пучка v_0 при записи голограммы в режиме переэкспозиции. Эти диапазоны зависимости $\eta(v)$ в рамках модели DOG (10) отдельно не представлены, инструментов для настройки АФ (10) на аппроксимацию в этих диапазонах в модели нет. Традиционный подход к аппроксимации по интегральному критерию минимума среднего квадрата ошибки (СКО) проблему представления высокочастотного диапазона не решает, так как в силу малого удельного веса высокочастотных компонент они дают незначительный вклад в величину СКО. Но игнорировать высокочастотную часть зависимости ДЭ от частоты нельзя, поскольку именно она доминирует в формировании глобального максимума АКФ, в первую очередь — его вершины и актуальных на практике значений уровня измерения радиуса отклика β . В результате использование модели (10) в представленном виде может вести к неадекватной модели отклика голографической схемы, а в конечном счете интерес представляет именно отклик схемы.

Для решения этой проблемы имеет смысл использовать критерий аппроксимации не в фурье-пространстве H (плоскости голограммы), а в пространстве откликов — выходной плоскости схемы Out. Соответственно задача нахождения передаточной функции предстает уже не как аппроксимация, но как моделирование — нахождение функции, эквивалентной передаточной по заданному критерию, например, критерию минимума ошибки глобального максимума импульсного отклика и/или ГМ АКФ, и/или радиуса отклика по требуемому уровню β .

Импульсный отклик схемы как фурье-образ аппроксимирующей функции (10)

$$h(\xi) = \hat{F}(H(v)) = \hat{F}\left(a_1 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{v_1}\right)^2\right) - a_2 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{v_2}\right)^2\right)\right) = a_1 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi}{\xi_1}\right)^2\right) - a_2 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi}{\xi_2}\right)^2\right), \quad (14)$$

где параметры

$$\xi_1 = \frac{1}{2\pi v_1} \quad \text{и} \quad \xi_2 = \frac{1}{2\pi v_2}$$

измеряются по уровню $\beta = 0.606$ [28].

Наличие в пространстве откликов только одного критерия — минимума СКО или ошибки радиуса отклика

Средние квадраты ошибки аппроксимации зависимости ДЭ от частоты и глобального максимума импульсного отклика

Голограмма	СКО аппроксимации ДЭ		СКО аппроксимации ГМ ИО	
	Аналитически	Численно	Аналитически	Численно
I	0.164	0.259	0.208	$3.75 \cdot 10^{-3}$
II	0.249	0.087	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1.027 \cdot 10^{-3}$

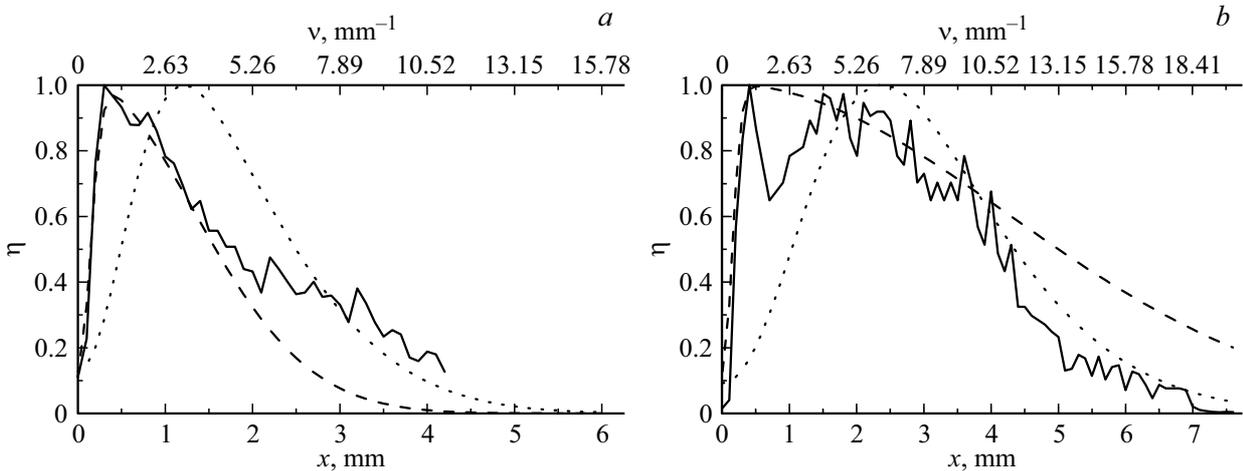


Рис. 2. Зависимости нормированной локальной дифракционной эффективности η голограмм I (a) и II (b) от пространственной координаты x и пространственной частоты ν : сплошная линия — экспериментальные данные, штриховая линия — аналитически найденная аппроксимирующая функция DOG (10), пунктир — функция DOG (10), эквивалентная по критерию минимума ошибки глобального максимума импульсного отклика (14).

по заданному уровню β — не позволяет решить задачу четырехпараметрической оптимизации аналитически. С учетом нормировки (7) задача может быть сведена к трехпараметрической посредством принятия $a_1 = 1$, но проблему аналитического нахождения параметров это не решает. Необходим переход к численным методам.

2. Численное моделирование и экспериментальная проверка

Для проверки правомочности изложенного подхода к моделированию передаточной функции эквивалентной, определяемой по критерию минимума СКО для ГМ отклика в выходной (корреляционной) плоскости, использованы голограммы Фурье, записанные при разных условиях с эталонного изображения, представляющего реализацию двумерного фрактального броуновского движения со степенным спектром [29]

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

где $H \in [0, 1]$ — параметр Хёрста. Голограммы записывались на ГРС ПФГ-03м (АО „Компания Славич“), проявитель ГП-8, при значениях частоты равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков ν_0 , обеспечивающих наличие явно выраженного участка инверсной зависимости ДЭ в низкочастотном диапазоне

$\nu < \nu_0$. Для примера на рис. 2, a и b для двух характерных случаев записи голограмм даны экспериментальные зависимости ДЭ от пространственной координаты x (нижняя ось абсцисс), связанной с представленной на верхней оси абсцисс пространственной частотой ν посредством $x = \lambda f \nu$, где $\lambda = 633 \text{ nm}$ — длина волны, $f = 600 \text{ mm}$ — фокусное расстояние первой фурье-преобразующей линзы L_1 , а также функции модели DOG (10): аппроксимирующая и моделирующая, эквивалентная по критерию минимума ошибки глобального максимума импульсного отклика (14).

Голограмма I записана при согласовании локальной экспозиции на частоте ν_0 с верхней границей рабочего участка динамического диапазона ЭХ ГРС — имеется выраженный максимум зависимости $\eta(\nu)$ в области ν_0 , при этом в области высоких пространственных частот (примерно $\nu > 3.5 \text{ mm}^{-1}$) наблюдается явная неадекватность аппроксимации зависимости $\eta(\nu)$ моделью DOG (10).

Голограмма II записана с переэкспозицией — вследствие выбора локальной экспозиции на частоте ν_0 , соответствующей диапазону насыщения ЭХ ГРС, в области ν_0 имеется не максимум зависимости $\eta(\nu)$, но подобие плато. Как результат переэкспозиции в области ν_0 :

— „провал“ ДЭ в области нулевых частот глубже, чем у голограммы I;

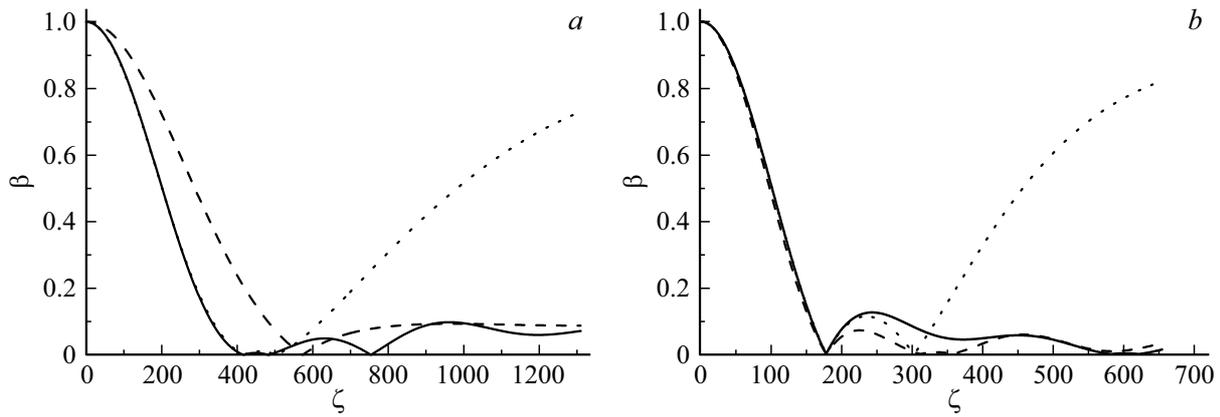


Рис. 3. Импульсные отклики (нормированные значения) схемы рис. 1 для представленных на рис. 2 голограмм I (a) и II (b), ξ — координата в корреляционной плоскости: сплошная линия — для экспериментальных данных, штриховая линия — для аналитически найденной аппроксимирующей зависимости $\eta(\nu)$ функции DOG (10), пунктир — функция DOG (14), удовлетворяющая критерию минимума ошибки глобального максимума импульсного отклика.

— высокочастотный диапазон существенно шире, чем у голограммы I, так как он попал в рабочий участок динамического диапазона ЭХ ГРС, при этом высокочастотная часть достаточно адекватно аппроксимируется функцией DOG (10).

На рис. 3, a, b представлены импульсные отклики схемы рис. 1 для этих голограмм, обозначения соответствуют обозначениям рис. 2. Даны модули откликов, поскольку реально измеряются только их мощности.

В таблице даны СКО аппроксимации измеренной зависимости ДЭ от частоты $\eta(\nu)$ и глобального максимума экспериментального импульсного отклика (ИО): аналитической моделью (10) и численно по критерию минимума СКО (14) для этих голограмм.

На рис. 4 приведены абсолютные значения относительных ошибок аппроксимации радиуса отклика в зависимости от уровня β . Для голограммы I дана зависимость относительной ошибки только для численного подбора эквивалентной функции, так как при аналитической аппроксимации передаточной функции относительная ошибка, как это хорошо видно из рис. 3, a, явно велика — ее значения находятся в диапазоне 0.4–0.67.

Аналогичные результаты были получены и для других высокочастотных голограмм — во всех случаях численный подбор параметров функции (14) давал лучшую, сравнительно с аппроксимацией самой передаточной функции моделью DOG (10) аппроксимацию импульсного отклика схемы.

Заключение

Таким образом, в случае высокочастотных голограмм Фурье, характеризующихся наличием явно выраженного участка инверсной зависимости дифракционной эффективности от пространственной частоты в диапазоне частот, ниже частоты равенства локальных амплитуд

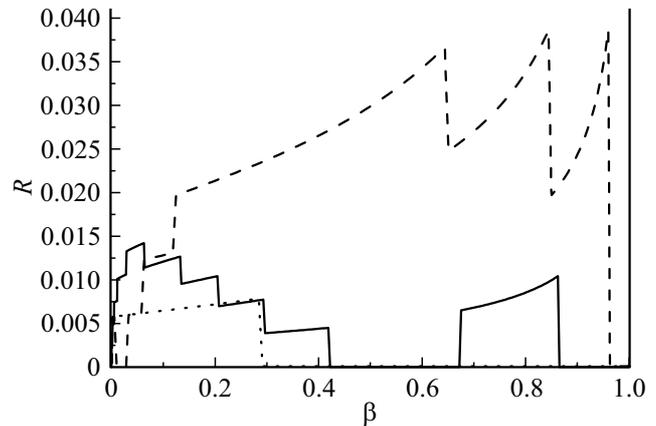


Рис. 4. Зависимости абсолютных значений относительной ошибки R аппроксимации радиуса импульсного отклика в пределах глобального максимума от его уровня β : сплошная линия — голограмма I, численный подбор параметров модели DOG (14), штриховая линия — голограмма I, аналитическая аппроксимация передаточной функции моделью DOG (10), пунктир — голограмма II, численный подбор параметров модели DOG (14).

эталонного спектра и опорного пучка, моделирование эквивалентной по критерию минимума ошибки аппроксимации импульсного отклика схемы передаточной функции функцией DOG дает адекватную (с учетом общепринятых требований к погрешности аналоговой обработки не более 0.1) модель глобального максимума импульсного отклика. Достоинство данного подхода — простота и наглядность аналитического описания голографической схемы, что практически важно и с точки зрения снижения требований к вычислительной мощности и памяти процессора при компьютерных реализациях и использовании дискретных пространственно-временных модуляторов и сенсоров [22–24].

Рисунки 3, *a, b* наглядно демонстрируют, что изложенный подход к аппроксимации импульсного отклика посредством моделирования эквивалентной передаточной функции правомочен только в пределах глобального максимума импульсного отклика. Соответственно подход применим только в задачах обработки информации, предполагающих работу исключительно с глобальным максимумом отклика схемы, например, в задачах корреляционного распознавания образов [22–24], включая компьютерные методы, реализации нечетких логик [21] и т. п.

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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.М. Сороко. *Основы голографии и когерентной оптики*. (Наука, М., 1971), 616 с.
- [2] 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)].
- [3] 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)].
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Л.П. Амосова, А.Н. Чайка. *Письма в ЖТФ*, **33**(6), 57 (2007). URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/11855> [L.P. Amosova, A.N. Chaika. *Technical Phys. Lett.*, **33**(6), 255 (2007)]. DOI: 10.1134/S1063785007030200
- [7] 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)].
- [8] 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)].
- [9] С.А. Александрина, А.М. Кулешов. *Опт. и спектр.*, **68**(3), 652 (1990).
- [10] 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
- [11] Ю.Ф. Шляк. *Опт. и спектр.*, **57**(3), 484 (1984).
- [12] Ю.Ф. Шляк. *Опт. и спектр.*, **57**(4), 696 (1984).
- [13] А.М. Яглом. *Корреляционная теория стационарных случайных функций*. (Гидрометеоиздат, Л., 1981), 280 с.
- [14] А.Е. Алтынов, В.В. Грузинов, И.В. Мишин. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, (1) 2017, 34. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_28341894_68655679.pdf
- [15] А.М. Алексеев, А.В. Павлов. *Опт. и спектр.*, **107**(6), 1038 (2009). [A.M. Alekseev, A.V. Pavlov. *Opt. Spectrosc.*, **108**, 137–142 (2010)]. DOI: 10.1134/S0030400X10010212
- [16] А.В. Павлов, А.О. Гаугель, А.М. Алексеев. *Опт. и спектр.*, **130**(9), 1389 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.09.53300.3478-22
- [17] Е.И. Шубников. *Опт. и спектр.*, **62**(2), 450 (1987). [E.I. Shubnikov. *Opt. Spectrosc.*, **62**(2), 268 (1987)].
- [18] Е.И. Шубников. *Опт. и спектр.*, **62**(3), 653 (1987). [E.I. Shubnikov. *Opt. Spectrosc.*, **62**(3), 389 (1987)].
- [19] А.В. Павлов. *Опт. и спектр.*, **90**(3), 515 (2001). [A.V. Pavlov. *Opt. Spectrosc.*, **90**(3), 452 (2001)]. DOI: 10.1134/1.1358459
- [20] А.В. Павлов. *Опт. и спектр.*, **119**(1), 146 (2015). [A.V. Pavlov. *Opt. Spectrosc.*, **119**(1), 146 (2015)]. DOI: 10.1134/S0030400X1507022X
- [21] А.В. Павлов. *Компьютерная оптика*, **44**(5), 728 (2020). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.
- [22] П.А. Ручка, Н.М. Вереникина, И.В. Гриценко, Е.Ю. Злоказов, М.С. Ковалев, Г.К. Красин, С.Б. Одинок, Н.Г. Сцепуро. *Опт. и спектр.*, **127**(4), 563 (2019). [P.A. Ruchka, N.M. Verenikina, I.V. Gritsenko, E.Yu. Zloказov, 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
- [23] Е.Ю. Злоказов. *Квант. электрон.*, **50**(7), 643 (2020). [E.Yu. Zloказov. *Quantum Electronics*, **50**(7), 643 (2020)]. DOI: 10.1070/QEL17291
- [24] 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. Zloказov, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, R.S. Starikov, P.A. Cheremkhin. *Quantum Electronics*, **50**(7), 667 (2020)]. DOI: 10.1070/QEL17295
- [25] Н.М. Астафьева. *УФН*, **166**(11), 1146 (1996). [N.M. Astaf'eva. *Physics-Uspekhi*, **39**(11) 1065 (1996)]. DOI: 10.1070/PU1996v039n11ABEH000177
- [26] R.R. Jingade, R.S. Kunt. *Expert Systems with Applications*, **201**, 117207 (2022). DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117207
- [27] J. Abacousnac, D.G. Grier. *Opt. Express*, **30**, 23568 (2022). DOI: 10.1364/OE.458544
- [28] Р.М. Кроновер. *Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории*. Перевод с англ. (Постмаркет, М., 2000), 352 с. [Richard M. Crownover. *Introduction to Chaos and Fractals*. (Jones and Bartlett Publishers, Inc., Boston, London, 1995)].
- [29] М.М. Мирошников. *Теоретические основы оптико-электронных приборов*. (Машиностроение, Л., 1977), 600 с.