

УДК 535.417

ПОДАВЛЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ В СХЕМЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАФИИ, ОСНОВАННОЙ НА ДВУХБЛОЧНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ИЗ ФРЕНЕЛЕВСКИХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН С ОБЩЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСЬЮ

Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

e-mail: levhar@ysu.am

(Поступила в редакцию 18 июня 2018 г.)

В ранее предложенной схеме рентгеновской Фурье-голографии, основанной на двухблочном интерферометре из френелевских зонных пластин с общей оптической осью, налагаются жесткие требования к размерам исследуемого образца. Несоблюдение этих условий приводит к образованию искажений в восстановленном изображении. В представленной работе исследуется механизм образования этих искажений и возможность их подавления.

1. Введение

В последние десятилетия усовершенствование технологии изготовления френелевских зонных пластин (ФЗП) послужило толчком к развитию разных направлений рентгеновской оптики, в том числе Фурье-голографии [1–4]. В этих работах ФЗП используются в качестве делителя исходного излучения и для формирования вторичного источника сферической опорной волны.

В работе [5] представлена схема Фурье-голографии для жесткого рентгеновского излучения, основанного на двухблочном интерферометре из ФЗП. Показано, что при регистрации неоднородностей образца с низкими пространственными частотами интерферометр работает в режиме деления амплитуды, с равными длинами траекторий в обоих плечах интерферометра. В случае же неоднородностей с высокими частотами интерферометр перестает работать в вышеуказанном режиме, и ужесточаются условия, налагаемые на характеристики когерентности исходного излучения.

Наряду с аналитическими исследованиями представленной схемы в отмеченной работе проведено численное моделирование записи голограммы и последующее восстановление изображения предмета. Показано, что при несоблюдении требований, предъявляемых к параметрам интерферометра, необходимых

для блокировки «нежелательных» каналов распространения излучения (оно нарушено специально с целью увеличения размеров исследуемого образца), на нижней половине восстановленного изображения появляются так называемые «интерференционные искажения» в виде радиальных полос и некоего «узора» под предметом.

Целью настоящей работы является исследование механизма возникновения этих искажений и возможности их устранения.

2. Схема интерферометра и механизм образования искажений

Подробная схема интерферометра для регистрации голограмм представлена на рис.1. Он состоит из двух ФЗП с общей главной оптической осью, удаленных друг от друга на расстояние $2F$ (F – фокусное расстояние первого порядка дифракции ФЗП). Предметная плоскость находится на задней фокальной плоскости второй ФЗП, а детектор голограммы – за предметной плоскостью на расстоянии F от него. Непосредственно перед первой ФЗП расположен нож с горизонтальным краем, закрывающий более половины зонной пластины. В предметной плоскости находится непрозрачный экран, с квадратным окном для предмета и круглой диафрагмой с центром на оптической оси для опорной волны. В плоскость голограммы введена координатная система (\tilde{x}, \tilde{y}) с началом координат в точке пересечения голограммы с оптической осью. Ось \tilde{x} направлена по горизонтали, а ось \tilde{y} – вверх по вертикали. Аналогичная координатная система (x, y) с началом координат в центре восстановленного изображения введена в плоскость изображения.

Предметная волна формируется дифракциями первого порядка на обеих ФЗП. Образованный при этом параллельный пучок, проходя сквозь исследуемый объект, падает на голограмму. Опорная волна формируется волной, проходящей

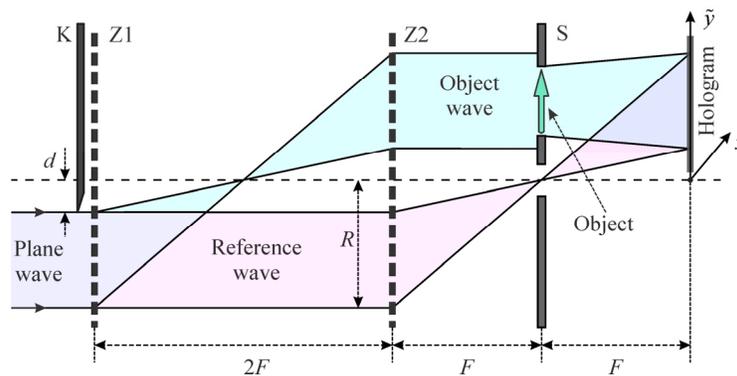


Рис.1. Схема интерферометра для записи голограммы: Z1 и Z2 – первая и вторая ФЗП, соответственно, K – нож и S – экран в предметной плоскости.

без дифракции (нулевой порядок дифракции) от первой ФЗП и дифрагированной в первом порядке на второй. Фокусируясь после этого в предметной плоскости и переходя сквозь диафрагму, образованная сферическая волна падает на голограмму и интерферирует с предметной волной.

Рассмотренный интерферометр сходен с ранее представленным трехблочным интерферометром из ФЗП [6] для отображения рентгеновского фазового контраста [7, 8] с тем основным отличием, что предметная плоскость перемещена в фокальную плоскость второго блока, а детектор голограммы размещен на месте третьего блока.

Обозначим через (n, m) волновой канал интерферометра, образованный дифракциями n -ого и m -ого порядков, соответственно, на первом и втором блоках интерферометра. С учетом только 0, -1 и $+1$ порядков дифракции в интерферометре останется 9 каналов распространения. Из них $(+1, +1)$ и $(0, +1)$ – предметная и опорная волны, соответственно. Рассмотрим поведение остальных 7 каналов. В приближении геометрической оптики построением траекторий лучей можно показать, что пять из этих каналов – $(0, 0)$, $(0, -1)$, $(-1, 0)$, $(-1, +1)$ и $(-1, -1)$ – полностью поглощаются нижней половиной экрана на предметной плоскости, если радиус центральной диафрагмы меньше расстояния (d) края ножа от оптической оси (в рассмотренном нами случае радиус диафрагмы выбран $d/2$).

Рассмотрим канал распространения $(+1, 0)$. При условии

$$d > R/3, \quad (1)$$

где R – радиус ФЗП, канал $(+1, 0)$ не пересекается с голограммой. В случае же несоблюдения этого условия, что предпочтительно с точки зрения увеличения размеров исследуемого образца, часть канала $(+1, 0)$ падает на голограмму. Если интерференция между опорной и предметной волнами образует изображение предмета, то интерференция канала $(+1, 0)$ с этими волнами приводит к образованию двух типов искажений на восстановленном изображении. Искажения, образованные в результате интерференции между каналом $(+1, 0)$ и опорной волной обозначим через D_{ref} , а искажения, соответствующие интерференции канала $(+1, 0)$ с предметной волной – через D_{obj} .

Рассмотрим местоположение этих, так называемых «интерференционных искажений». На рис.2 приведены траектории лучей канала $(+1, 0)$, опорной и предметной волн, собирающихся в определенной точке (P') голограммы. Как видно из рисунка, углы между этими лучами связаны соотношениями

$$\varphi_{D,\text{ref}} = (2/3)\varphi_0, \quad \varphi_{D,\text{obj}} = (1/3)\varphi_0, \quad (2)$$

где φ_0 – угол между лучами опорной и предметной волн, $\varphi_{D,\text{ref}}$ – угол между

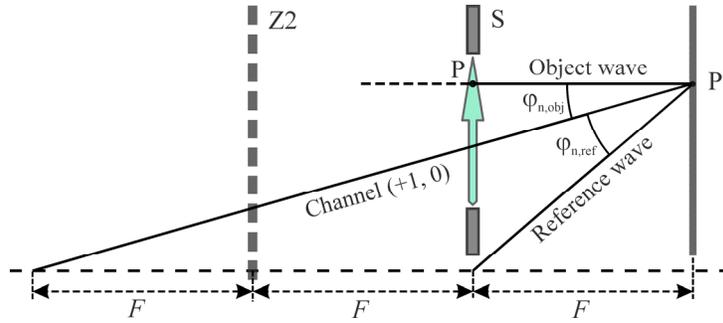


Рис.2. К расчетам местоположений «интерференционных искажений».

лучами канала $(+1, 0)$ и опорной волны, а $\varphi_{D,obj}$ – угол между лучами канала $(+1, 0)$ и предметной волны.

Поскольку восстановление изображения сводится к двумерному обратному Фурье-преобразованию распределения интенсивности голограммы [9], то отображение интерференционной картины на восстановленном изображении удалено от начала координат на расстояние, пропорциональное углу между интерферирующими пучками, в направлении, перпендикулярном к интерференционным полосам. Отсюда, с учетом (2), получим соотношения для y -координат отображений интерференционных картин в окрестности точки P' голограммы:

$$y_{D,ref} = (2/3)y_0, \quad y_{D,obj} = (1/3)y_0. \quad (3)$$

Здесь $y_{D,ref}$ и $y_{D,obj}$ соответствуют искажениям D_{ref} и D_{obj} , соответственно, а y_0 – изображению точки P предмета (см. рис.2). При выборе масштаба восстановления 1:1, имеем $y_0 = \tilde{y}_0$, где \tilde{y}_0 – \tilde{y} -координата точки P' на голограмме.

Аналогичные оценки для канала $(+1, -1)$, образующего искажения D'_{ref} и D'_{obj} , приводят к соотношениям

$$d > R/5, \quad (4)$$

$$\varphi'_{D,ref} = 0.6\varphi_0, \quad \varphi'_{D,obj} = 0.4\varphi_0, \quad (5)$$

$$y'_{D,ref} = 0.6y_0, \quad y'_{D,obj} = 0.4y_0 \quad (6)$$

вместо старых (1)–(3), соответственно. Введенные здесь новые обозначения отличаются от старых прибавлением верхнего штриха. При оценке искажений, следует иметь ввиду, что на голограмме интенсивность канала $(+1, -1)$ меньше интенсивности канала $(+1, 0)$.

Интерференция между каналами $(+1, 0)$ и $(+1, -1)$ не рассматривается, так как в этом случае угол интерферирующих лучей слишком мал и соответствующие искажения довольно близко расположены к началу координат.

На рис.3а,в приведены соответственно исходный объект и восстановленное из голограммы его изображение. Горизонтальными линиями на рис.3в отмечены границы «интерференционных искажений» при малых значениях x , определенных согласно формулам (3) и (6), с учетом возможного усечения каналов $(+1, 0)$ и $(+1, -1)$ при прохождении через предметную плоскость. Как видно из рисунка, приведенные значения соответствуют восстановленному изображению, за исключением нижней границы искажения D_{ref} , что может быть объяснено дифракцией канала $(+1, 0)$ на краю ножа К (см. рис.1).

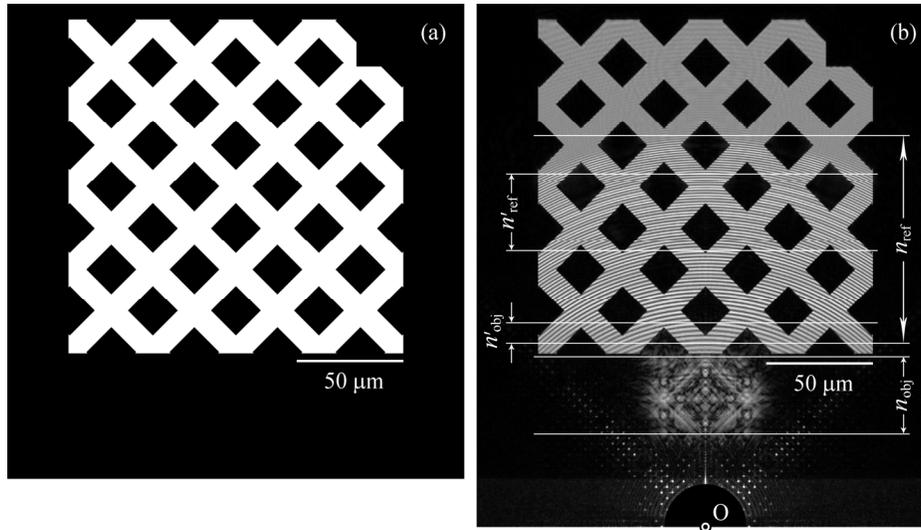


Рис.3. (а) Исследуемый предмет и (b) его изображение, восстановленное из голограммы, с отмеченными областями «интерференционных искажений». Точка O на рис.3b – начало осей координат (x, y) . Внизу восстановленного изображения заметна тень непрозрачного полукруга, расположенного с целью подавления центрального изображения.

Расчеты проведены для использованных в работе [5] численных значений основных параметров эксперимента, а именно: длина волны рентгеновского излучения $\lambda = 0.1$ нм, радиус ФЗП $R = 275.7$ мкм, ширина последней зоны Френеля $\Delta R = 181.5$ нм, фокальное расстояние первого порядка дифракции $F = 1$ м, глубина травления зонной структуры кремниевых ФЗП $h = 9.48$ мкм и расстояние края ножа от оптической оси интерферометра $d = 43.1$ мкм.

3. Подавление искажений восстановленного изображения

В основе рассматриваемого метода подавления искажений лежит обстоятельство, согласно которому «интерференционные искажения» и основные компоненты изображения объекта в определенной точке восстановленного

изображении формируются из разных областей голограммы. Из соотношений (3) и (6) для \tilde{y} -координат областей голограммы, ответственных за формирование искажений D_{ref} , D_{obj} , D'_{ref} и D'_{obj} и за низкочастотные компоненты изображения предмета в определенной точке изображения (обозначим их как $\tilde{y}_{D,\text{ref}}$, $\tilde{y}_{D,\text{obj}}$, $\tilde{y}'_{D,\text{ref}}$, $\tilde{y}'_{D,\text{obj}}$ и \tilde{y}_0 , соответственно) получим выражения

$$\begin{aligned}\tilde{y}_{D,\text{ref}} &= 1.5y_0, & \tilde{y}_{D,\text{obj}} &= 3y_0, \\ \tilde{y}'_{D,\text{ref}} &= (5/3)y_0, & \tilde{y}'_{D,\text{obj}} &= 2.5y_0, \\ \tilde{y}_0 &= y_0.\end{aligned}\tag{7}$$

где y_0 – y -координата рассматриваемой точки изображения. Исходя из этих соотношений предлагается следующий механизм подавлений «интерференционных искажений». При восстановлении определенного участка изображения затемняются участки голограммы, формирующие искажения в этой области изображения, и оставляется открытой область, дающая основной вклад в формирование изображения самого предмета.

Таким образом, восстановление изображения предмета проводится не одним шагом, а послойно с горизонтальными слоями. При каждом шаге затемняется часть голограммы с $\tilde{y} > \alpha y_{\text{min}}$ ($1 < \alpha < 1.5$), где y_{min} – нижний край восстанавливаемого слоя. Согласно соотношениям (7), указанным затемнением блокируются «интерференционные искажения» выше линии $y = (\alpha/1.5)y_{\text{min}} < y_{\text{min}}$ изображения, а следовательно, и на рассматриваемом слое. Чем уже

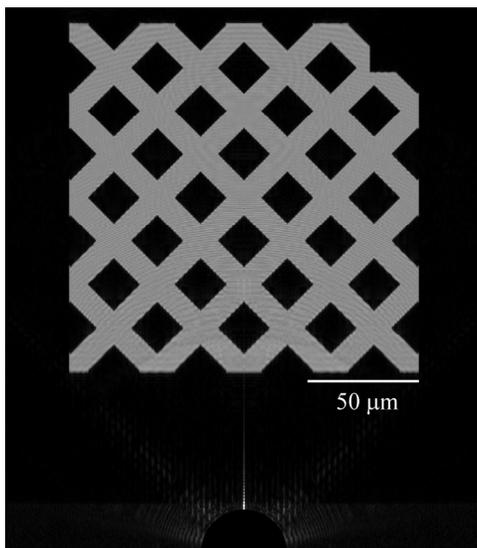


Рис.4. Изображение предмета, восстановленное «послойным» методом.

восстанавливаемая полоса, тем больше расстояние между его верхней границей и затемненной областью и, соответственно, тем меньше высокочастотных пространственных компонент будут потеряны при восстановлении изображения из-за затемнения части голограммы. Результат такого послойного восстановления для рассмотренного на рис.3 случая представлен на рис.4. При восстановлении изображения ширина полос выбрана $\Delta y = 0.05 y_{\min}$, и $\alpha = 1.4$. Отметим, что представленный многошаговый подход увеличивает лишь процессорное время численных расчетов, оставляя неизменным продолжительность измерений.

4. Заключение

Работа посвящена исследованию так называемых «интерференционных искажений» возникающих в восстановленном изображении ранее предложенной схемы рентгеновской Фурье-голографии с использованием интерферометра из двух ФЗП [5]. Хотя отмеченные искажения исчезают при достаточно большом размере ножа, расположенного перед первым блоком интерферометра (см. рис.1 и условие (1)), такой подход нежелателен из-за малого поперечного сечения оставшегося излучения, а следовательно, и размера исследуемого образца.

Предложена так называемая «послойная» схема восстановления изображения предмета, позволяющая подавлять вышеотмеченные искажения. Недостатком этой схемы является понижение разрешающей способности восстановленного изображения, являющееся следствием «затемнения» определенных частей голограммы, по ходу послойного восстановления изображения.

Автор благодарит М.К. Баляна за обсуждение работы и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen, E.H. Anderson, M.R. Howells, D.P. Kern. Science, **256**, 1009 (1992).
2. W. Leitenberger, A. Snigirev. J. Appl. Phys., **90**, 538 (2001).
3. N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohigashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki, S. Aoki. J. Phys. IV France, **104**, 551 (2003).
4. N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohigashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki, S. Aoki. AIP Conf. Proc., **705**, 1340 (2004).
5. M. Balyan, L. Haroutunyan. J. Synchrotron Rad., **25**, 241 (2018).
6. Л.А. Арутюнян. Изв. НАН Армении, Физика, **50**, 390 (2015).
7. Л.А. Арутюнян. Изв. НАН Армении, Физика, **51**, 381 (2016).
8. L.A. Haroutunyan. Proceedings of the YSU, Physical and Mathematical Sciences, **51**, 101 (2017).
9. Оптическая голография, под ред. Г. Колфилда, т.1. Москва, Мир, 1982.

ԱՂԱՎԱՂՈՒՄՆԵՐԻ ՃՆՇՈՒՄԸ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԱՌԱՆՅՔՈՎ
ՖՐԵՆԵԼՅԱՆ ԳՈՏԻԱԿԱՆ ԹԻԹԵՂՆԵՐԻՑ ԲԱՂԿԱՑԱԾ
ԵՐԿԲԼՈԿ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱՉԱՓԻ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ
ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՖՈՒՐԻԵ-ՀՈԼՈԳՐԱՖԻԱՅԻ ՄԽԵՄԱՅՈՒՄ

Լ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Ընդհանուր օպտիկական առանցքով ֆրենելյան գոտիական թիթեղներից բաղկացած երկբլոկ ինտերֆերաչափի վրա հիմնված ռենտգենյան Ֆուրիե-հոլոգրաֆիայի արդեն ներկայացված սխեմայում խիստ սահմանափակումներ են դրվում ուսումնասիրվող նմուշի չափերի նկատմամբ: Այս սահմանափակումների անտեսումը բերում է վերականգնված պատկերի աղավաղման: Ներկայացված աշխատանքում հետազոտվում է այդ աղավաղումների առաջացման մեխանիզմը և նրանց ճնշման հնարավորությունը:

SUPPRESSION OF DISTORTIONS IN THE X-RAY FOURIER-TRANSFORM
HOLOGRAPHY SCHEME BASED ON THE TWO-BLOCK FRESNEL ZONE
PLATE INTERFEROMETER WITH COMMON OPTICAL AXIS

L.A. HAROUTUNYAN

Strict requirements were imposed on the sizes of testing sample in the previously suggested scheme of hard X-ray Fourier-transform holography based on a two-block Fresnel zone plate interferometer with common optical axis. The failure of these requirements leads to appearance of distortions in the reconstructed image. In this work, the mechanism of distortion formation, as well as possibility of its suppression are considered.