

УДК 535.41; 535.417

СРАВНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ И ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО ОБЪЕКТА

И.А. Шевкунов^а, Н.В. Петров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Адрес для переписки: Shevkunov_igor@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.09.14, принята к печати 10.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-14-21

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шевкунов И.А., Петров Н.В. Сравнение голографических и итерационных методов при восстановлении изображения амплитудного объекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 14–21

Аннотация. Представлено экспериментальное сравнение четырех методов восстановления волнового фронта. Рассмотрены два итерационных и два голографических метода, отличающихся математической моделью и алгоритмами восстановления. Первые два из рассматриваемых методов не используют опорную волну в схеме записи, что снижает требования к стабильности установки. Основную роль в восстановлении информации о фазе такими методами играют наборы пространственных распределений интенсивности, которые записываются по мере перемещения регистрирующей матрицы вдоль оптической оси. Полученные данные последовательно используются для восстановления волнового фронта с помощью итерационной процедуры, в ходе которой численно моделируется распространение волнового фронта между плоскостями, где производилась регистрация данных. При этом информация о фазе волнового фронта везде сохраняется, а рассчитанные распределения амплитуды заменяются на измеренные в этих плоскостях. В первом из сравниваемых методов в качестве математической модели используется двумерное преобразование Фурье и итерационный расчет в плоскости объекта. Во втором методе для численного моделирования распространения волнового фронта применяется метод углового спектра, и итерационный расчет производится только между близко расположенными плоскостями регистрации данных. Сравнимые с ними два метода цифровой голографии основаны на использовании опорной волны в схеме записи и различаются между собой численным алгоритмом восстановления цифровых голограмм. В результате сравнения установлено, что итерационный метод на основе 2D-преобразования Фурье дает результат, сравнимый с результатом распространенного голографического метода, использующего Фурье-фильтрацию. Показано, что голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля при восстановлении амплитудного объекта является лучшим среди рассмотренных.

Ключевые слова: фазовая проблема, восстановление волнового фронта, цифровая голография

Благодарности. Авторы благодарят за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

COMPARISON OF HOLOGRAPHIC AND ITERATIVE METHODS FOR AMPLITUDE OBJECT RECONSTRUCTION

I.A. Shevkunov^a, N.V. Petrov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Shevkunov_igor@mail.ru

Article info

Received 11.09.14, accepted 10.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-14-21

Article in Russian

Reference for citation: Shevkunov I.A., Petrov N.V. Comparison of holographic and iterative methods for amplitude object reconstruction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 14–21 (in Russian)

Abstract. Experimental comparison of four methods for the wavefront reconstruction is presented. We considered two iterative and two holographic methods with different mathematical models and algorithms for recovery. The first two of these methods do not use a reference wave recording scheme that reduces requirements for stability of the installation. A major role in phase information reconstruction by such methods is played by a set of spatial intensity distributions, which are recorded as the recording matrix is being moved along the optical axis. The obtained data are used consistently for wavefront reconstruction using an iterative procedure. In the course of this procedure numerical distribution of the wavefront between the planes is performed. Thus, phase information of the wavefront is stored in every plane and calculated amplitude

distributions are replaced for the measured ones in these planes. In the first of the compared methods, a two-dimensional Fresnel transform and iterative calculation in the object plane are used as a mathematical model. In the second approach, an angular spectrum method is used for numerical wavefront propagation, and the iterative calculation is carried out only between closely located planes of data registration. Two digital holography methods, based on the usage of the reference wave in the recording scheme and differing from each other by numerical reconstruction algorithm of digital holograms, are compared with the first two methods. The comparison proved that the iterative method based on 2D Fresnel transform gives results comparable with the result of common holographic method with the Fourier-filtering. It is shown that holographic method for reconstructing of the object complex amplitude in the process of the object amplitude reduction is the best among considered ones.

Keywords: phase retrieval problem, wavefront reconstruction, digital holography.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for support, project #2014/190 for government projects in the area of scientific activities within the basic part of the government task.

Введение

Задача полного восстановления волнового фронта из распределений интенсивности в последнее время привлекает большое внимание. Связано это с тем, что методы ее решения предъявляют значительно меньшие требования к реализации, чем традиционные голографические методы, несмотря на использование более сложных вычислительных алгоритмов. Первыми итерационный алгоритм восстановления полного поля предложили Гершберг и Сакстон [1]. Авторы использовали пространственные амплитудные распределения волнового поля, зарегистрированные в плоскости объекта и в Фурье-плоскости. Однако предложенный ими алгоритм в ряде случаев демонстрировал такие проблемы, как стагнация и чувствительность к шумам и ошибкам. Впоследствии эти сложности удалось преодолеть при помощи использования дополнительных наборов данных в итерационном алгоритме [2]. Наиболее простым способом получения таких наборов данных является регистрация распределений интенсивностей в различных плоскостях [3–5], однако не исключены и другие подходы, такие как вариация длины волны [6, 7] или использование канонических преобразований [8].

Как видно, существует множество путей решения фазовой проблемы. Порой не всегда легко разобраться, каким методом и при каких условиях лучше воспользоваться, поэтому в последнее время все чаще стали появляться работы, посвященные сравнению существующих методов восстановления волнового фронта [9–14]. Например, работы [9, 10] посвящены сравнению методов, основанных на использовании априорной информации о фазе объекта, а работа [11] рассматривает методы, применимые в электромагнитной дозиметрии. В [12] производится сравнение методов цифровой голографии, использующих Фурье-фильтрацию, с новым, предложенным авторами настоящей работы методом, основанным на концепции пространственных фазовых шагов. В [13] рассматривают модифицированные итерационные методы, а работа [14] посвящена сравнению эффективности методов восстановления фазы, использующих уравнение переноса излучения в зависимости от равномерности распределения плоскостей регистрации и граничных условий.

Целью данной работы является сравнение двух итерационных безопорных методов восстановления фазы, нового метода восстановления комплексной амплитуды поля из внеосевых цифровых голограмм и традиционного голографического метода, использующего Фурье-фильтрацию. Выбор методов для сравнения обусловлен следующими факторами: итерационный метод SBMIR (Single Beam Multiple Intensity Reconstruction) показал хорошую сходимость при использовании большого количества плоскостей регистрации [15]; FRIM (FResnel Iterative Method) – метод, предложенный научной группой Университета ИТМО [5] – использует меньший набор данных для восстановления и позволяет учесть распределения интенсивности, записанные при вариации не только расстояния между плоскостями, но и (или) длины волны используемого излучения; DHCWR (Digital Holography Complex Wave Retrieval) – голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля – обеспечивает отсутствие мнимого изображения за счет использования процедуры восстановления, основанной на решении переопределенной системы уравнения для каждого пикселя [16]; DHFF (Digital Holography Fourier Filtration) – устоявшийся метод обработки голограмм – выбран в качестве референтного [17].

Методы

Рассмотрим кратко основные принципы исследуемых в данной работе методов.

FRIM – итерационный метод, использующий в математической модели 2D-преобразование Френеля:

$$U(x, y, l) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \iint \exp\left(\frac{ik}{2l}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right) u(x', y') dx' dy',$$

где $U(x, y, l)$ – комплексное поле объекта на расстоянии l ; x, y – координаты в плоскости изображения; $u(x', y')$ – комплексное поле в плоскости объекта; x', y' – координаты в плоскости объекта; λ – длина волны; $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, i – мнимая единица. Порядок использования измеренных итерационных изо-

бражений в FRIM следующий: $I_1 \rightarrow O \rightarrow I_2 \rightarrow O \rightarrow I_3 \rightarrow O \rightarrow \dots \rightarrow O \rightarrow I_n \rightarrow O \rightarrow I_1 \dots$. Здесь I_n – пространственные распределения интенсивности, записанные в плоскостях на различных расстояниях от объекта; стрелками обозначено распространение волнового фронта в свободном пространстве; $O = v(x', y')$ аппроксимированная объектная функция в плоскости объекта. При наступлении сходимости эта функция совпадает с $u(x', y')$ [5].

SBMIR – однолучевой итерационный восстановительный метод с использованием большого количества плоскостей регистрации. Здесь в качестве математической модели используется метод распространения углового спектра плоских волн [15], который позволяет рассчитывать распространение волнового поля между двумя близко расположенными плоскостями:

$$U(x, y, l) = u \iint_{\mathbb{R}^2} \hat{u}(f_x, f_y) \exp\left(\frac{i2\pi \cdot l}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot df_x df_y,$$

где $U(x, y, l)$ – комплексная функция, описывающая волновое поле выходной плоскости; $\hat{u}(f_x, f_y)$ – Фурье-преобразование волнового поля начальной плоскости $u(x', y')$; x, y – координаты в плоскости регистрации; x', y' – координаты в плоскости объекта; f_x, f_y – пространственные частоты в плоскости регистрации; l – переменная распространения; λ – длина волны. Первая итерация включает в себя последовательный расчет волнового фронта с первой до последней плоскости регистрации в прямом направлении. Перед началом следующей итерации волновой фронт, полученный на последней итерационной плоскости, распространяется в первую: $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow I_1 \dots$. При наступлении сходимости восстановленный волновой фронт распространяется в плоскость объекта.

DHCWR – голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля [16]. В данном методе информация о волновом фронте объекта получается в результате двух независимых процедур.

1. Восстановление амплитуды и фазы объектной волны в плоскости измерения в соответствии с концепцией пространственных фазовых шагов. Однако, в отличие от самого метода фазовых шагов, для вычисления фазы в каждом пикселе значения интенсивности берутся не из нескольких независимых интерферограмм в полосах бесконечной ширины, а из соседних пикселей вокруг искомого, которые расположены на одной голограмме.
2. Численное распространение восстановленного волнового фронта в плоскость изображения. Для осуществления первого этапа восстановления необходимо знать фазу опорной волны, и в случае использования плоского волнового фронта в качестве опорного достаточно знать только угол, под которым фронт падает на регистрирующую матрицу. Угол определяется из любой записанной голограммы по ширине интерференционных полос участка, где фаза объектной волны постоянна. Ключевая же идея алгоритма заключается в том, что интенсивность голограммы $I(x, y)$ и фаза опорной волны $\Phi(x, y)$ в плоскости голограммы меняются намного быстрее, чем неизвестные величины – восстанавливаемая комплексная волна $U(x, y)$ и амплитуда опорной волны $A(x, y)$. Таким образом, объектная волна $U(x, y)$ и амплитуда опорной волны $A(x, y)$ – константы в некоторой области пикселя $p(x, y)$. Для определения $U(x, y)$ и $A(x, y)$ необходимо решать в каждой области пикселя $p(x, y)$ систему из M нелинейных уравнений, где M – количество рассматриваемых точек в окрестности данного пикселя:

$$I(p + p_m) = |U(p) + A(p) \exp[i\Phi(p + p_m)]|^2, \tag{1}$$

где $I(p)$ – полученная голограмма; $p + p_m$ ($m = 1, \dots, M$) – позиция m -го пикселя в окрестности p . Величина M выбирается исходя из требования, что используемые при решении системы уравнений соседние пиксели должны попадать как минимум под одну интерференционную полосу. Это необходимо для успешного применения концепции пространственных фазовых шагов. Система (1) переопределена и сводится к решению системы линейных уравнений для каждого пикселя:

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^* \\ \alpha & \beta & 1 \\ \alpha^* & 1 & \beta^* \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Psi \\ Z \\ Z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_m w_m I_m \\ \sum_m w_m V_m I_m \\ \sum_m w_m V_m^* I_m \end{pmatrix},$$

где $\alpha = \sum_m w_m V_m$; $\beta = \sum_m w_m V_m^2$; V_m – нормированная комплексная опорная волна; w_m – весовой множитель, необходимый для выполнения условия о постоянстве $U(x, y)$ и $A(x, y)$ в окрестности точки p , чем дальше расположен рассматриваемый пиксель от p , тем меньше весовой множитель; $\Psi = |Z|^2/A^2 + A^2$ и $Z = U^*A$ – вспомогательные переменные («*» означает комплексное сопряжение).

DHFF – цифровая голография с использованием Фурье-фильтрации. В данном методе для восстановления поля объектной волны применяется 2D-Фурье-преобразование для пространственной фильтрации в Фурье-плоскости полезного сигнала. Таким образом, удается избавиться от дифракционного слагаемого нулевого порядка и мнимого изображения [17]. Выражение для формируемой на регистрирующей матрице голограммы имеет вид:

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 + |U(x, y)|^2 + U(x, y)A^*(x, y) + U^*(x, y)A(x, y),$$

где $I(x, y)$ – голограмма; $*$ – оператор комплексного сопряжения, $A(x, y)$ – опорная волна, $U(x, y)$ – объектная волна. Фазу опорной волны $\Phi(x, y)$ можно представить в виде пространственной модуляции по координатам: $\Phi(x, y) = -2\pi(f_x x + f_y y)$, где f_x и f_y – пространственные частоты по соответствующим координатам. Для осуществления фильтрации производится вычисление преобразования Фурье полученной голограммы:

$$F[I(x, y)] = F[|A(x, y)|^2 + |U(x, y)|^2] + F[U(x, y)]|A(x, y)| \otimes \delta(f_x - f_{0,x}, f_y - f_{0,y}) + F[U^*(x, y)]|A(x, y)| \otimes \delta(f_x + f_{0,x}, f_y + f_{0,y}),$$

где $F[\dots]$ – обозначение преобразования Фурье; \otimes – оператор свертки; $(f_x \pm f_{0,x}, f_y \pm f_{0,y})$ – член частотного сдвига, обусловленного поведением фазы опорной волны. Первый член данного выражения представляет собой Фурье-образ нулевого порядка, второй – объекта, третий – мнимого изображения. Избавляясь от первого и третьего слагаемых в Фурье-пространстве, информация о фазе можно получать только из второго. Применяя обратное преобразование Фурье, осуществляется переход из Фурье-плоскости в плоскость регистрации. Далее восстановленное поле переносится в плоскость изображения с помощью преобразования Френеля.

Эксперимент

Для сравнения представленных выше методов была разработана универсальная экспериментальная установка, позволяющая записывать как внеосевые цифровые голограммы, так и наборы пространственных распределений интенсивностей, необходимые для восстановления волнового фронта итерационными методами. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. За ее основу взят интерферометр Маха–Цендера за исключением того, что в нашем случае опорный пучок проходит больший оптический путь, чем предметный, но не более длины когерентности используемого лазера. Также для регистрации распределений интенсивностей в нескольких отстоящих друг от друга плоскостях, необходимых для использования в итерационных методах восстановления фазы волнового фронта, система была расширена добавлением моторизированной микрометрической подвижки. На подвижке располагались регистрирующая матрица 6, светоделитель 5 и зеркало 9. В качестве источника излучения использовался одномодовый лазер Lasos RLD F-638-50-rvc, $\lambda = 634,9$ нм. Для регистрации распределений интенсивности была использована КМОП-матрица «VEI-830» 2048×1536 , с размером пикселя $\Delta x = 2,8$ мкм.

В режиме записи голограммы плоский волновой фронт после коллиматора 1 делился светоделителем 2 на объектный и опорный пучки, далее в объектном плече располагался нейтральный фильтр 3 для выравнивания интенсивностей световых полей обоих плеч системы, после фильтра ослабленное излучение попадало на исследуемый объект 4, где формировалось спекл-поле, которое после прохождения светоделителя 5 регистрировалось КМОП-матрицей 6. Опорный волновой фронт, в свою очередь, приходил на матрицу под небольшим углом θ (регулируемым зеркалом 9), необходимым для наблюдения и регистрации интерференции полос конечной ширины при взаимодействии с объектной волной. Размер окна M в методе DHCWR был выбран равным 11, что обусловлено шириной наблюдаемых интерференционных полос.

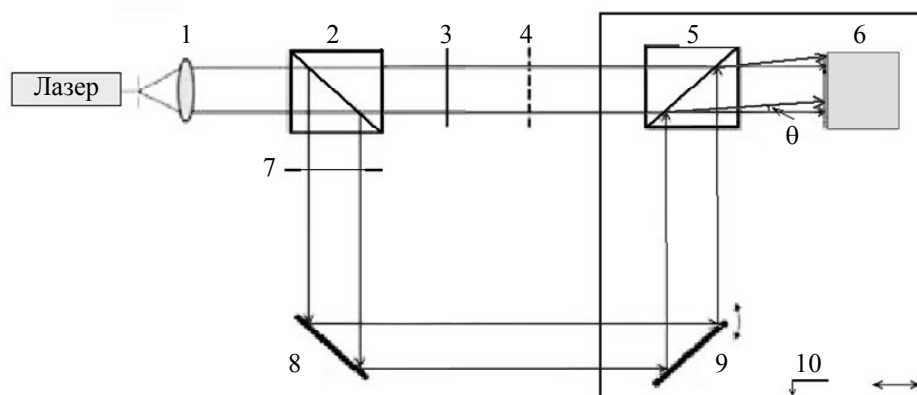


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – коллиматор; 2, 5 – светоделитель; 3 – светофильтр; 4 – исследуемый объект; 6 – КМОП-матрица; 7 – диафрагма; 8, 9 – зеркала; 10 – подвижка

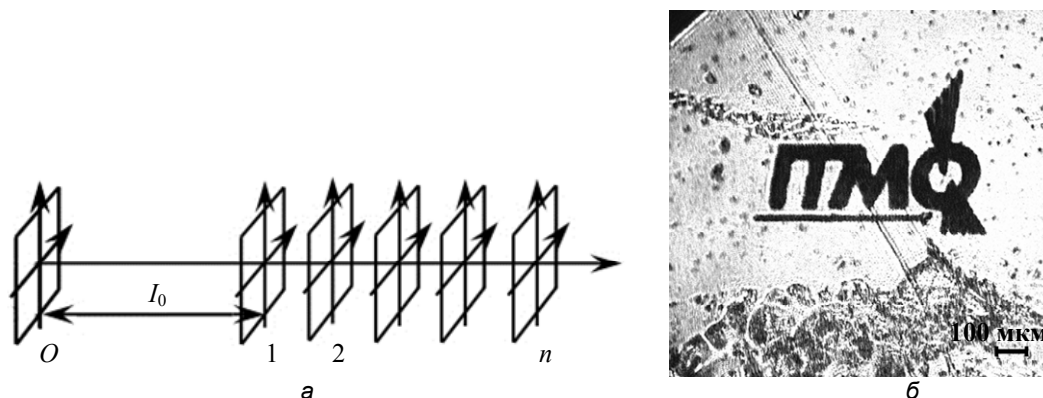


Рис. 2. Схема для измерения набора данных для пространственного распределения интенсивностей (а); изображение объекта, снятое при помощи 4F-системы (б)

Во время реализации итерационных методов опорная часть из зеркал 8, 9 отсекалась диафрагмой 7, и в регистрации изображения была задействована только объектная часть установки. При перемещении моторизированной подвижки 10 осуществлялась запись набора распределений интенсивностей, необходимых для восстановления волнового фронта. Начальное расстояние $l_0 = 26$ мм для первой плоскости регистрации было обусловлено физическими размерами светоделителя 5. Всего было использовано три распределения интенсивности, расстояния между которыми были выбраны по 1 мм в соответствии с критерием, дающим наилучшее качество восстановления, описанным в работе [18]. На рис. 2, а схематично изображены объектная плоскость (О) и плоскости измерения интенсивностей. Тест-объект (логотип «ITMO») был изготовлен на пленке для микрофильмирования. На рис. 3, б, представлено изображение объекта, снятое при использовании 4F-системы. Размеры объекта $0,5 \times 0,6$ мм², высота букв 0,2 мм.

Полученные результаты и обсуждение

На рис. 3 изображены изображения объекта «ITMO», восстановленные четырьмя различными методами: итерационными – FRIM (рис. 3, а) и SBMIR (рис. 3, б); голографическими – DHCWR (рис. 3, в) и DHFF (рис. 3, г). Из представленных результатов видно, что все методы обеспечивают удовлетворительные результаты восстановления изображения, хотя и проявляют незначительные различия в деталях. Из-за особенностей итерационного подхода метода FRIM, связанного с чередующимся вычислением распространения волнового фронта от плоскостей регистрации к плоскости объекта и обратно, имеют место дифракционные артефакты, возникающие по краям восстановленного изображения. Для численного сравнения полученных результатов был проведен расчет граничного контраста и наименьшего среднеквадратичного отклонения (НСКО) полученных амплитуд от амплитуды 4F-системы. НСКО вычисляется по формуле [19]

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum (|V_s| - |U_s|)^2}{\sum |U_s|^2}},$$

где V_s – значение амплитуды оцениваемого изображения пикселя s ; U_s – значение амплитуды пикселя s амплитуды 4F-системы. Граничный контраст представляет собой отношение разности интенсивностей снаружи границы (I_{out}) объекта и внутри (I_{in}) [20]:

$$K = \frac{I_{out} - I_{in}}{I_{out}}.$$

В таблице приведены значения НСКО и граничного контраста для полученных изображений. Высокие значения граничного контраста говорят о том, что все рассмотренные методы приемлемы для восстановления изображений, но наибольший контраст достигается при восстановлении цифровых голограмм методом DHCWR. Метод DHFF показывает наибольшие значения НСКО, что характеризует его как худший из представленных методов: изображение, восстановленное данным методом, темнее на периферии. Это связано с потерями полезной информации при осуществлении фильтрации нулевого порядка и мнимого изображения. Нюансы сравнения наглядно раскрываются на рис. 4, где представлены распределения амплитуды восстановленного изображения вдоль сечения, проходящего через буквы «IT» (красные линии на увеличенных фрагментах рис. 3). Помимо результатов восстановления, полученных четырьмя рассматриваемыми методами, для сравнения на рис. 4 также представлено сечение амплитуды поля, полученное из зарегистрированного распределения интенсивности с использованием 4F-системы и нормированное по максимальному для рассматриваемых методов значению восстановленной амплитуды. Необходимость нормировки обусловлена большей мощностью лазера при записи распределения интенсивности в конфигурации 4F.

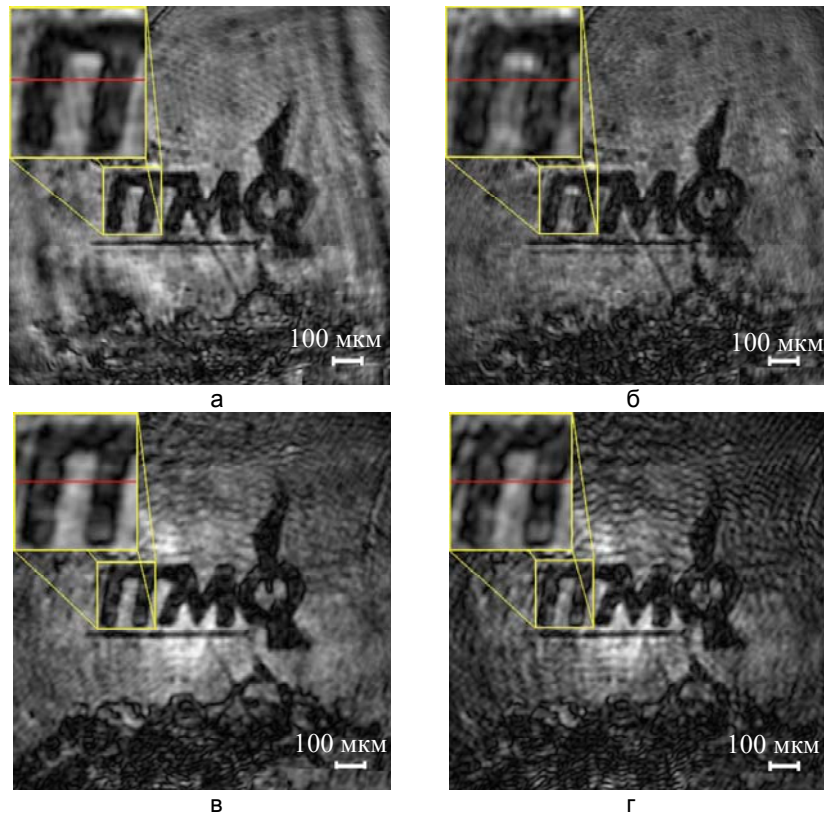


Рис. 3. Восстановленные изображения объекта: FRIM (а); SBMIR (б); DHCWR (в); DHFF (г)

	FRIM	SBMIR	DHCWR	DHFF
E_s	0,50	0,60	0,54	0,62
K	0,92	0,87	0,93	0,91

Таблица. Значения НСКО и граничного контраста

Сравнивая результаты, полученные с помощью итерационных методов, с результатами восстановления голограмм, можно заметить, что итерационные методы дают более резкие изображения: так, на рис. 3, а, б, отчетливо видны изображения пылинок, в то время как на рис. 3, в, г, присутствуют только искаженные изображения фона. На рис. 4 также можно заметить, что профиль символов «IT» более сглажен в случае восстановления голографическими методами.

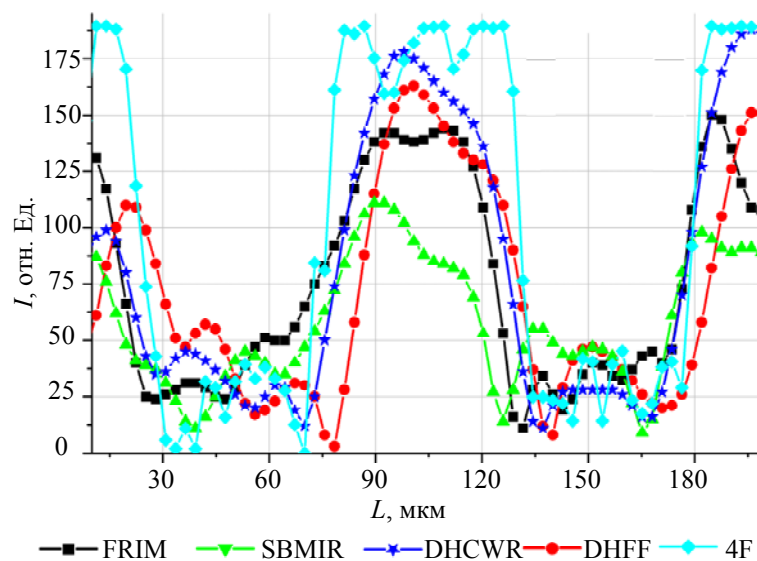


Рис. 4. Сечения распределений амплитуд восстановленных изображений различными методами: FRIM, SBMIR, DHCWR, DHFF, 4F-система. L – расстояние вдоль красной линии увеличенных фрагментов рис. 3

Данное наблюдение можно объяснить следующим образом.

В методе DHCWR производится решение системы M уравнений в окрестности каждого пикселя. Из-за ограничений, накладываемых на M , происходит снижение разрешения до размеров, определяемых толщиной интерференционных полос. Таким образом, разрешение данного метода ограничено несколькими пикселями, что соответствует величине 6–12 мкм в условиях данного эксперимента. В методе DHFF использование пространственной фильтрации в Фурье-плоскости приводит к фактическому уменьшению разрешения. Применение же процедуры заполнения фильтруемого изображения нулями лишь позволяет увеличить сетку на восстановленном изображении, в то время как фактически количество информации не увеличивается. Стоит также обратить особое внимание на поведение итерационных методов FRIM и SBMIR. Сравнивая полученные данными методами результаты, можно сделать вывод, что границы символов на восстановленных методом FRIM изображениях более резкие, а само изображение более контрастное. Аналогичный результат был продемонстрирован нами в работе [21], посвященной сравнению трех итерационных методов. Однако в [21] метод SBMIR обеспечил лучшее качество восстановления, чем в настоящей работе. Вероятно, это связано с тем, что, в отличие от голографических, итерационные методы крайне чувствительны к юстировке. Погрешности в определении различных параметров, такие как расстояния между зарегистрированными распределениями интенсивностей, смещения плоскостей регистраций по координатам x и y , в итерационном расчете многократно усиливаются. Метод SBMIR, обычно использующий более 10 распределений интенсивности, должен быть более устойчивым к помехам такого рода. Оценка подобного рода ошибок была произведена в статьях [8, 22], где с помощью методов численного моделирования было показано, что отклонение расстояния между плоскостями регистрации на 0,1 мм от реального значения приводит к росту среднеквадратической ошибки более чем в 1,5 раза, а отклонение в поперечном направлении на 0,5 мкм – более чем в 10 раз. Совместно с другими факторами, увеличивающими ошибки, такими как вибрации или несовпадение оптической оси с направлением движения моторизированной подвижки, это приводит к заметному ухудшению качества восстановленного изображения. Однако ввиду таких преимуществ итерационных методов, как отсутствие опорного пучка, светоделителей и линз, достигается максимальная простота оптической системы. В связи с этим необходимо найти возможность исключить из результата вклад ошибок, связанных с перемещением регистрирующей матрицы. Это можно реализовать в методе FRIM, варьируя длину волны вместо расстояния в процессе записи данных. Другим вариантом является полное исключение движущихся частей из системы регистрации за счет использования пространственно-временного модулятора света [23].

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод о дальнейшей перспективности развития итерационных методов восстановления фазы волнового фронта.

Заключение

Было произведено сравнение итерационных и голографических методов восстановления волнового фронта. Голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля (DHCWR) показал наибольший контраст восстановленного объекта среди рассмотренных методов. Итерационный метод FRIM на основе 2D-преобразования Френеля дал результат, по контрасту близкий к лучшему, и наименьшее среднеквадратическое отклонение, но с наличием дифракционных артефактов по краям восстанавливаемого изображения, проявление которых вероятно можно уменьшить при использовании аподизирующих функций. Метод SBMIR был разработан для большего количества зарегистрированных плоскостей, и, вероятно, поэтому восстановленные им изображения обладали меньшим контрастом и наибольшим среднеквадратичным отклонением. Голографический метод с применением Фурье-фильтрации (DHFF) показал контраст, сравнимый с методом FRIM, но большие величины НСКО ввиду потерь информации при фильтрации нулевого порядка и мнимого изображения в Фурье-плоскости.

Литература

1. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optics*, 1972, vol. 35, pp. 237–246.
2. Petrov N.V., Volkov M.V., Bepalov V.G. Iterative phase retrieval based on the use of additional intensities measurements. *Frontiers in Optics*. San Jose, USA, 2011.
3. Almore P., Pedrini G., Osten W. Complete wavefront reconstruction using sequential intensity measurements of a volume speckle field. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 34, pp. 8596–8605.
4. Almore P., Maalo A.M.S., Hanson S.G. Fast-convergent algorithm for speckle-based phase retrieval and a design for dynamic wavefront sensing. *Applied Optics*, 2009, vol. 48, no. 8, pp. 1485–1493. doi: 10.1364/AO.48.001485
5. Petrov N.V., Volkov M.V., Gorodetsky A.A., Bepalov V.G. Image reconstruction using measurements in volume speckle fields formed by different wavelengths. *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7907, art. 790718. doi: 10.1117/12.876151

6. Bao P., Zhang F., Pedrini G., Osten W. Phase retrieval using multiple illumination wavelengths. *Optics Letters*, 2008, vol. 33, no. 4, pp. 309–311. doi: 10.1364/OL.33.000309
7. Bao P., Situ G., Pedrini G., Osten W. Lensless phase microscopy using phase retrieval with multiple illumination wavelengths. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 22, pp. 5486–5494. doi: 10.1364/AO.51.005486
8. Nalegaev S.S., Petrov N.V., Bepalov V.G. Iteratsionnye metody resheniya fazovoi problemy v optike i ikh osobennosti [Special features of iteration methods for phase problem in optics]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 6 (82), pp. 30–35.
9. Kim W. Comparison among iterative algorithms for phase retrieval. *Proc. Int. Conf. on Signal Processing and Multimedia Applications, SIGMAP 2010*. Athens, Greece, 2010, pp. 112–117.
10. Osherovich E., Zibulevsky M., Yavneh I. Algorithms for phase retrieval with a (rough) phase estimate available: a comparison. *Technical Report CS-2010-22*, 2010.
11. Johansson M., Fhager A., Lui H.-S., Persson M. Comparison between two phase retrieval methods for electromagnetic source modeling. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2011, no. 30, pp. 239–253.
12. Kim D., Magnusson R., Jin M., Lee J., Chegal W. Complex object wave direct extraction method in off-axis digital holography. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 3658–3668. doi: 10.1364/OE.21.003658
13. Falaggis K. Reduction of the stagnation effect by combined iterative and deterministic single beam phase retrieval techniques. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, vol. 9203, p. 92030U. doi: 10.1117/12.2061995
14. Martinez-Carranza J., Falaggis K., Jozwick M., Kozacki T. Comparison of phase retrieval techniques based on the transport of intensity equation using equally and unequally spaced plane separation criteria. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, vol. 9204, p. 92040G. doi: 10.1117/12.2061976
15. Pedrini G., Osten W., Zhang Y. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 8, pp. 833–835. doi: 10.1364/OL.30.000833
16. Liebling M., Blu T., Unser M. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2004, vol. 21, no. 3, pp. 367–377.
17. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1982, vol. 72, no. 1, p. 156.
18. Petrov N.V., Galiaskarov A.N., Nikolaeva T.Yu., Bepalov V.G. The features of optimization of a phase retrieval technique in THz frequency range. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, vol. 8413, art. 84131T. doi: 10.1117/12.978688
19. Fienup J.R., Kowalczyk A.M. Phase retrieval for a complex-valued object by using a low-resolution image. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1990, vol. 7, no. 3, pp. 450–458. doi: 10.1364/JOSAA.7.000450
20. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Image-quality criteria in the digital holography of particles. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 4, pp. 208–211. doi: 10.1364/JOT.79.000208
21. Shevkunov I.A., Petrov N.V. Experimental comparison of phase retrieval methods which use intensity distribution at different planes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 536, art. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/536/1/012028
22. Zhang Y., Zhang X. Reconstruction of a complex object from two in-line holograms. *Optics Express*, 2003, vol. 11, no. 6, pp. 572–578.
23. Dudley A., Milione G., Alfano R.R., Forbes A. All-digital wavefront sensing for structured light beams. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 11, pp. 14031–14040. doi: 10.1364/OE.22.014031

Шевкунов Игорь Александрович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Shevkunov_igor@mail.ru, N.Petrov@phoi.ifmo.ru

Петров Николай Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, доцент, N.Petrov@phoi.ifmo.ru

Igor A. Shevkunov — PhD, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Shevkunov_igor@mail.ru

Nikolai V. Petrov — PhD, senior scientific researcher, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, N.Petrov@phoi.ifmo.ru