

## МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО НАБЕГА В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ БЕЗ ЛИКВИДАЦИИ ФАЗОВЫХ РАЗРЫВОВ

Белашов А.В.<sup>1,2</sup>, Петров Н.В.<sup>1</sup>, Семенова И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

### Аннотация

Представлен метод вычисления разности двух произвольных пространственных фазовых распределений, восстановленных с цифровых голограмм. Предложенный метод применим в двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии, особенно для случаев оценки возмущений между экспозициями на сильно зашумлённых или промодулированных спекл-структурой цифровых голограммах, поскольку для вычисления разности фаз не используется процедура получения абсолютных значений фазы для каждого из фазовых распределений. Вместо этого, по аналогии с классическим интерферометрическим методом двух экспозиций, на основе восстановленных распределений амплитуды и фазы рассчитывается интерференционная картина двух предметных волн, которая затем восстанавливается как цифровая голограмма тем же самым методом, который использовался для восстановления физически зарегистрированных голограмм. Преимущества предложенного метода наглядно представлены в численном эксперименте по вычислению разности фазовых распределений волновых фронтов, промодулированных спекл-структурой, и в физическом эксперименте по наблюдению динамики нагрева водного раствора фотосенсибилизатора лазерным излучением. Исследовано поведение предложенного метода в случае восстановления зашумлённых цифровых голограмм с различным уровнем шума.

**Ключевые слова:** цифровая голография, динамическая интерферометрия, восстановление фазы, спекл-структура, ликвидация фазовых разрывов.

### Введение

В связи с интенсивным развитием вычислительной техники и появлением матричных фоторегистраторов, большую популярность приобрели цифровые методы обработки голограмм, которые во многих аспектах стали достойной альтернативой методам традиционной голографии. Одним из важных направлений развития цифровых голографических методов является цифровая голографическая интерферометрия. Область её применения обширна и охватывает такие отрасли, как неразрушающий контроль: анализ деформаций [1], сравнение топологий копий промышленных деталей с эталоном [2], виброметрия [3]; медицина: наблюдение динамики биологических процессов в органеллах и клетках [4] и т. п.

Во многих из упомянутых задач для получения количественной информации о динамическом изменении исследуемого объекта рассматривается фазовый набег волнового фронта, приобретаемый им с течением времени. Традиционная процедура обработки цифровых голограмм в этом случае выглядит следующим образом: сначала производится восстановление амплитудного и фазового распределений двух предметных волн, отличающихся друг от друга на искомую величину, связанную с внесением возмущения, деформацией или различием форм двух сравниваемых объектов. Затем полученные фазовые распределения подвергаются процедуре развёртки фазы – ликвидации фазовых разрывов в окрестности значений  $-\pi$  и  $\pi$  [5]. После этого из полученных абсолютных фазовых распределений вычисляется искомая разность фаз. При использовании такого подхода [4, 6] получаемый результат сильно зависит от успеха приме-

нения процедуры ликвидации разрывов в пространственном распределении фазы. В случае, когда одно из пространственных распределений фазы априорно известно в абсолютных значениях (т.е. без разрывов в окрестности значений  $-\pi$  и  $\pi$ ), возможно вычисление разности фаз без ликвидации разрывов во втором распределении. Однако такая априорная информация доступна далеко не всегда. В случае, если контраст интерференционных полос на голограмме низкий, присутствуют сильные шумы или форма волнового фронта сильно неоднородна, как, например, при исследовании шероховатых объектов, развёртка фазы становится затруднительной. Чтобы обойти эту проблему, в методах спекл-интерферометрии фазовых шагов предварительно используют различные процедуры фильтрации [7–9] для подавления спекл-шума и нейтрализации фоновой засветки. Однако следует принимать во внимание, что такие преобразования уменьшают разрешение получаемого фазового распределения и могут применяться, только если частота модуляции в искомом возмущении значительно ниже частоты модуляции спекл-структуры. В виброметрии было предложено увеличить частоту регистрации голограмм, чтобы величина возмущения не превышала значения  $2\pi$  [3]. В таком случае становится возможным вычисление разности фаз без процедуры развёртки.

Существует также и другой подход, основанный на методах классической двухэкспозиционной интерферометрии, где интерферограмма формируется физически двумя оптическими волновыми фронтами, может быть зарегистрирована матричными фотоприёмниками и обработана, например, с помощью алгоритма, основанного на измерении смещений несущих интерференционных полос [10]. В этом случае абсолютная разность фаз полу-

чается из интерферограммы, без процедуры ликвидации разрывов. В классической реализации метода голографической интерферометрии на одном и том же месте голографического фотоматериала записывают две голограммы исследуемого объекта в двух состояниях. Затем фотоматериал подвергают процедуре обработки (чаще всего химической). Два интерферирующих волновых фронта формируются при оптическом восстановлении записанных голограмм. В качестве альтернативы голографическим фотоматериалам можно использовать пространственные модуляторы света, как это было реализовано в задаче сравнения формы двух объектов [2, 11].

Предложенный в данной работе алгоритм также основан на принципе формирования и обработки интерферограммы, однако имеет ряд отличий от методик, предложенных ранее. Во-первых, интерферограмма формируется численно из восстановленных с цифровых голограмм пространственных распределений амплитуды и фазы. Причём как для восстановления голограмм, так и для анализа интерферограммы нами используется метод восстановления комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации [12]. Он обеспечивает качественное восстановление волнового фронта из внеосевых голограмм даже при очень малых углах между предметной и опорной волнами, в отличие от метода, основанного на Фурье-фильтрации [6], где происходит наложение дифракционных порядков. Используемый нами метод восстановления также выгодно отличается и от широко известного метода фазовых шагов [7–9, 13], где необходимо прецизионно контролировать величину фазового набега, поскольку от этого зависит точность восстанавливаемого фазового распределения. Во-вторых, при расчёте цифровой интерферограммы от двух предметных волн, на основе одной из них сначала моделируется новая голограмма, в которой фаза опорной волны наклоняется на несколько больший угол по сравнению с тем, который использовался при записи. Это позволяет на рассчитываемой затем интерферограмме перейти от полос бесконечной ширины к полосам конечной ширины, причём именно эти полосы как раз и позволяют её рассматривать как голограмму и восстанавливать с помощью того же метода, что использовался для восстановления физически зарегистрированных голограмм.

Таким образом, преимущества предлагаемого нами подхода очевидны: можно получать разность любых фазовых распределений вне зависимости от наличия в них разрывов и сингулярных точек. Данная техника позволяет обрабатывать фазовые набеги любой величины (в том числе и превышающие  $2\pi$ ), отказаться от использования пространственно-временных фазовых модуляторов света и голографических фотоматериалов, требующих химической обработки. Таким образом, конструкция экспериментальной установки становится более простой, а процесс обработки данных автоматизирован.

#### Алгоритм вычисления разности фазовых распределений без их предварительной развёртки

Пусть имеются две произвольные комплексные объектные волны,  $A = |A| \exp(i\varphi)$ ,  $B = |B| \exp(i\psi)$ , на-

пример, соответствующие двум состояниям объекта до и после возмущения, а также стационарная плоская комплексная опорная волна  $C = |C| \exp(i\gamma)$ . Здесь и далее под символами, обозначающими амплитуды и фазы волн, подразумеваются пространственные распределения данных величин. Распределения интенсивностей в регистрируемых голограммах, образующихся в результате интерференции под углом  $\alpha$  волн  $A$  и  $C$ , а также волн  $B$  и  $C$ , будут иметь вид (рис. 1а, б):

$$I_1 = |A|^2 + |C|^2 + 2|A||C| \cos(\varphi - \gamma), \quad (1)$$

$$I_2 = |B|^2 + |C|^2 + 2|B||C| \cos(\psi - \gamma). \quad (2)$$

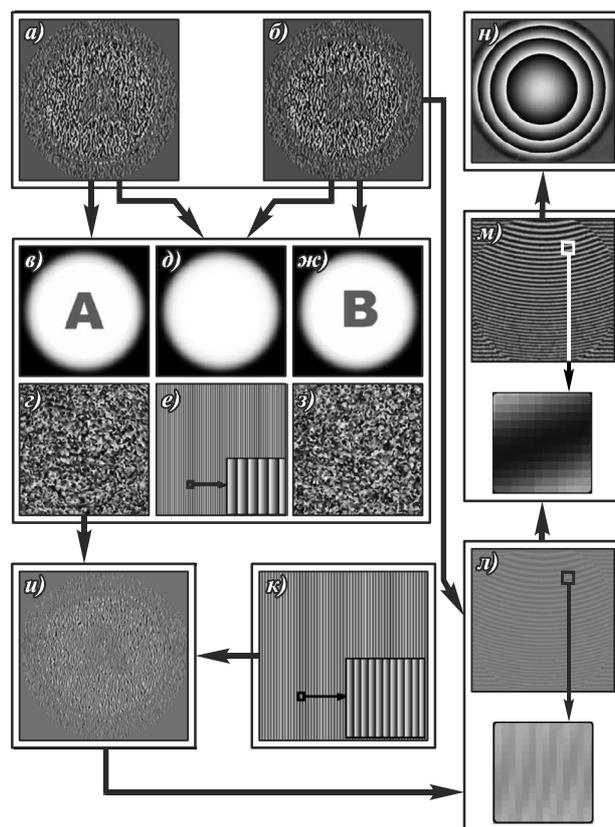


Рис. 1. Последовательность действий для вычисления разности фазовых распределений без их предварительной развёртки. Две зарегистрированные голограммы (а, б); восстановленные распределения амплитуды (в, д, ж) и фазы (е, з) первой предметной волны (в, г), опорной волны (д, е); второй предметной волны (ж, з); смоделированное распределение фазы опорной волны, падающей на матричный фотоприёмник под углом  $\alpha + \beta$  (к); интерференционная картина  $I_3$  первой предметной волны с синтезированной опорной волной (и); результат перемножения двух тригонометрических функций, отвечающих за интерференционные полосы в распределениях интенсивности  $I_2$  и  $I_3$ ; нормированная интерферограмма двух предметных волн  $A$  и  $B$ , записанная под углом  $\beta$ ; искомая разность фазовых распределений  $g$  и  $ж$ ; результат восстановления интерферограммы  $m$  (н)

Тогда предлагаемый алгоритм вычисления разности двух пространственных распределений можно представить в виде последовательности из шести действий:

1) Восстановление двух физически зарегистрированных цифровых голограмм  $I_1$  и  $I_2$  с целью получе-

ния распределений амплитуд предметных и опорной волн ( $|A|$ ,  $|B|$  и  $|C|$  соответственно), а также фазы предметной волны  $\varphi$  (рис. 1б–з). При этом фаза плоской опорной волны  $\gamma$  в используемом методе восстановления голограмм [12] синтезируется на основе априорной информации об угле, под которым она падает на матричный фотоприёмник.

2) Моделирование плоской опорной волны [14]  $|C|\exp(i(\gamma + \theta))$ , падающей на матричный фотоприёмник под углом  $\alpha + \beta$  несколько большим, чем используемый при регистрации угол между предметной и опорной волнами  $\alpha$  (рис. 1к). В результате этого к исходной фазе  $\gamma$  опорной волны  $C$  добавляется дополнительный фазовый набег  $\theta$ .

3) Моделирование цифровой голограммы  $I_3$ , на основе синтезированной опорной волны  $|C|\exp(i(\gamma + \theta))$  и предметной волны до возмущения  $|A|\exp(i\varphi)$  (рис. 1и):

$$I_3 = |A|^2 + |C|^2 + 2|A||C|\cos(\varphi - (\gamma + \theta)). \quad (3)$$

Следует отметить, что операции сложения или вычитания пространственных распределений фазы в аргументе функции косинус корректны, если хотя бы одна из функций представлена в виде абсолютных значений (т.е. ликвидированы разрывы). В данном случае это требование удовлетворяется, так как фаза моделируемой опорной волны изначально представлена в виде абсолютных значений.

4) Перемножение тригонометрических функций, отвечающих за интерференционные полосы в распределениях интенсивности  $I_2$  и  $I_3$ , описываемых формулами (2) и (3). Результат перемножения может быть представлен в виде следующего распределения (рис. 1л):

$$\begin{aligned} \cos(\varphi - \gamma)\cos(\varphi - (\gamma + \theta)) &= \\ &= \frac{I_2 - |B|^2 + |C|^2}{2|B||C|} \frac{I_3 - |A|^2 + |C|^2}{2|A||C|} = \\ &= \frac{\cos((\varphi - \gamma) + \theta)}{2} + \frac{\cos(\varphi + \gamma - 2\gamma - \theta)}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Предлагаемый метод работает в приближении быстро осциллирующей опорной волны, что может быть достигнуто выбором достаточно большой величины угла  $\alpha$  между предметной и опорной волнами. Тогда фаза опорной волны в плоскости матричного фотоприёмника  $\gamma$  (рис. 1е) будет меняться намного быстрее, чем фаза предметных волн  $\varphi$  и  $\varphi$ , до возмущения (рис. 1з) и после него (рис. 1з) соответственно. При этом второе слагаемое в правой части формулы (4) осциллирует намного быстрее первого.

5) Устранение быстро осциллирующего второго слагаемого в правой части формулы (4), реализуемое автоматизированной операцией сглаживания по квадратной области со стороной, равной размеру полной осцилляции (на практике 3–6 пикселей). Таким образом, будет получено пространственное распределение величины  $\cos((\varphi - \gamma) + \theta)$  (рис. 1м), которое фактически представляет собой нормированную интерферограмму двух предметных волн  $A$  и  $B$ , записанную под углом  $\beta$ .

Чтобы пояснить последнее утверждение, рассмотрим полученную в результате применения предложенного алгоритма двумерную функцию  $\cos((\varphi - \gamma) + \theta)$ . Несложно показать, что она представляет собой нормированное интерференционное слагаемое голограммы, возникающей в результате интерференции предметной  $|A + B|\exp(i(\varphi - \gamma))$  и опорной  $|C|\exp(i\theta)$  волн:

$$I_4 = |A + B|^2 + |C|^2 + 2|A + B||C|\cos((\varphi - \gamma) + \theta). \quad (5)$$

При этом угол между ними, очевидно, равен заданной ранее величине  $\beta$ , а фаза предметной волны  $(\varphi - \gamma)$  представляет собой искомую разность фаз двух предметных волновых фронтов  $A$  и  $B$ . Таким образом, полученное по формуле (4) распределение после операции сглаживания представляет собой цифровой аналог классической двухэкспозиционной интерферограммы.

6) Восстановление искомой разности фазовых распределений из полученной интерферограммы на основе анализа полос конечной ширины. Здесь следует отметить, что анализ полученной интерферограммы можно проводить с использованием традиционного алгоритма голографической интерферометрии, который основан на измерении смещений несущих интерференционных полос на голограмме. Однако с нашей точки зрения, удобнее применить метод восстановления комплексной амплитуды поля [12]. Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что основой данного метода является решение переопределённой системы уравнений, по своей сути имеющей сходство с методом фазовых шагов. Но при этом, в отличие от последнего, для вычисления фазы в каждом пикселе здесь значения интенсивности берутся не из нескольких независимых интерферограмм в полосах бесконечной ширины, а из соседних пикселей вокруг искомого, расположенных на одной голограмме (интерферограмме в полосах конечной ширины). При этом для успешного применения концепции фазовых шагов предполагается, что используемые при решении системы уравнений соседние пиксели должны попадать как минимум под одну интерференционную полосу. При увеличении толщины интерференционных полос, что имеет место при уменьшении угла  $\beta$ , необходимо лишь увеличивать ширину окна, определяющего количество используемых пикселей. К примеру, при углах  $\beta = 0,5^\circ$  приемлемое качество восстановления обеспечивалось при использовании квадратной области со стороной 28–40 пикселей.

Хотя представленный выше порядок действий для реализации предложенного алгоритма, с нашей точки зрения, является наиболее простым и применимым практически во всех случаях, следует упомянуть и о его возможных вариациях. Во-первых, в некоторых задачах, например, измерения статических деформаций, амплитуды предметной и опорной волн  $|B|$  и  $|C|$ , используемые в формуле (4), могут быть получены не только в процессе восстановления голограмм на первом шаге, но также из последовательно измеренных соответствующих распределений интенсивности.

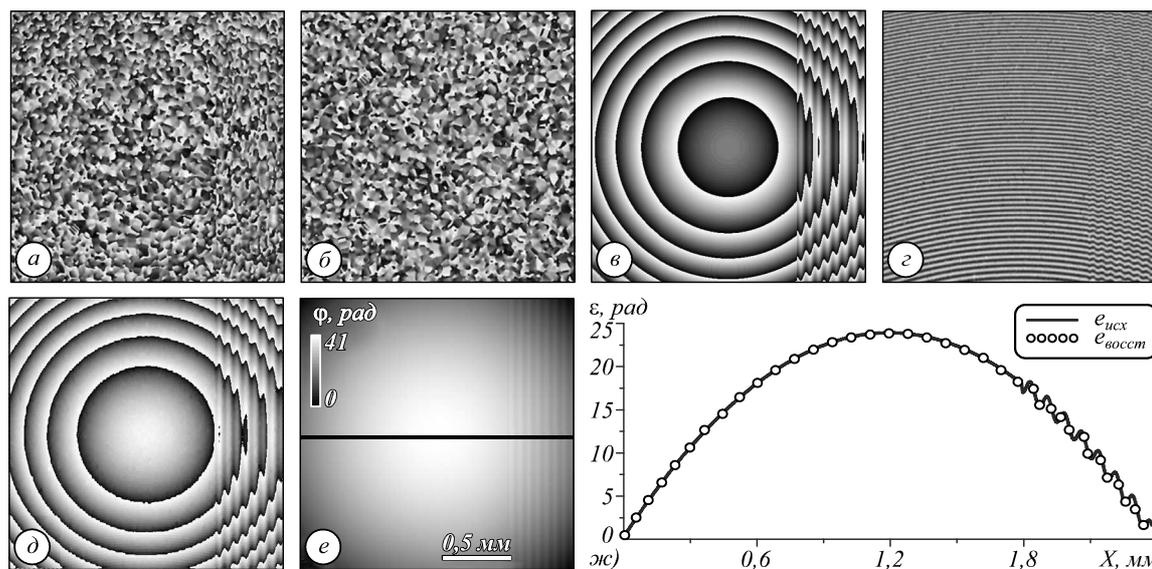


Рис. 2. Пространственные распределения фазы: невозмущённое (а) и после внесения возмущения (б); пространственное распределение искомого возмущения (в); интерференционная картина, несущая информацию о разности невозмущённой и возмущённой фазы (г), и полученные из неё разности фазовых распределений: в диапазоне значений  $(-\pi, \pi)$  (д), и абсолютное, полученное с помощью применения алгоритма ликвидации разрывов фазы [15] (е); сечения фазовых распределений, проведённые через чёрную горизонтальную линию, показанную на интерферограмме (ж), сплошной линией показано восстановленное распределение, пунктиром – изначально заданное

Во-вторых, вместо численного синтезирования, голограмма  $I_3$  может быть зарегистрирована экспериментально. Однако с практической точки зрения для этого требуется изменять угол между предметной и опорной волнами на некоторую величину  $\beta$ , которую необходимо точно измерить, так как даже небольшое несоответствие между измеренной величиной и её реальным значением приведёт к искажению искомого фазового распределения в ходе шестого шага в данном алгоритме.

Поясним также ещё раз более подробно необходимость искусственного увеличения угла между опорной и предметной волнами на величину  $\beta$  в синтезируемой голограмме. Данное действие обусловлено необходимостью создания внеосевой интерференционной картины, являющейся аналогом интерференционной картины в полосах конечной ширины в терминах классической голографической интерферометрии. Таким образом, при значении  $\beta = 0^\circ$  получается интерференционная картина, которая образовалась бы при записи интерференции двух предметных волн  $A$  и  $B$  в соосной оптической системе, например, в ходе записи интерференционной картины в полосах бесконечной ширины при использовании метода классической голографической интерферометрии. При этом условие относительно медленного изменения первого слагаемого в правой части формулы (4) предполагает относительно небольшое значение угла  $\beta$ . С другой стороны, при использовании некоторых методов восстановления волнового фронта из интерференционной картины  $I_4$  для более качественной обработки требуются достаточно большие значения этого параметра. Эмпирически нами было установлено, что значения угла  $\beta$  порядка  $0,4^\circ - 0,9^\circ$  удовлетворяют обоим требованиям.

Стоит также отметить, что ввиду применения усреднения по квадратным областям в пункте 4 данный алго-

ритм незначительно снижает пространственное разрешение в соответствии с размером данной области.

#### Вычисление разности фазовых распределений волновых фронтов, промодулированных спекл-структурой

В качестве апробации предложенного нами метода рассмотрим эксперимент по вычислению разности двух пространственных распределений фазы (рис. 2а, б), характерных для спекл-структуры, в одно из которых добавлено возмущение (рис. 2в), величину которого необходимо найти. Пространственное распределение фазы искомого возмущения задано в виде сегмента сферы с радиусом 30 см, в которое была добавлена искажённая область, где частота модуляции совпадает с частотой модуляции спекл-структуры.

На основе распределений фазы (рис. 2а, б) были смоделированы две внеосевые голограммы размером  $512 \times 512$  пикселей. Для моделирования использовались следующие параметры: величина угла в направлении горизонтальной оси между предметной и опорной волнами  $\alpha = 1,8^\circ$ , размер пикселя – 4,65 мкм, длина волны лазерного излучения – 632,8 нм. Моделирование интерферограммы (рис. 1г) производилось под углом  $\beta = 0,7^\circ$ , при обработке использовался размер окна области усреднения размером  $6 \times 6$  пикселей. Здесь стоит пояснить, что размер области усреднения зависит от того, насколько быстро меняется фаза предметной волны  $\gamma$ . При больших углах  $\alpha$  между предметной и опорной волнами данная величина изменяется быстрее, а значит, требуется усреднение по меньшей области. Так, в эксперименте со значением угла  $\alpha = 1,8^\circ$  и размером пикселя 4,65 мкм приемлемой областью усреднения являлся квадрат площадью 36 пикселей.

Обработка полученной в итоге интерференционной картины позволила получить разность фаз исследуемых распределений волновых фронтов, промодулированных спекл-структурой, и оценить величину возмущения (рис. 2д). Сравнивая полученное распределение фазы возмущения с исходным, трудно не заметить, что линии разрыва фазы расположены на нём иначе. Это связано с тем, что восстановленное методом [12] распределение фазового набега может отличаться на произвольную константу. Как следует из рис. 2ж, где представлены проходящие через центр сечения распределения фаз заданного и восстановленного возмущений, метод обеспечивает высокую точность. При этом величина погрешности зависит от размера квадратной области, используемой для реализации операции сглаживания, а также от качества восстановления фазы на первом шаге.

### Вычисление разности фазовых распределений при наличии шумов

Помимо возможности изучения волновых фронтов, промодулированных спекл-структурой, предложенный нами метод позволяет исследовать динамические процессы в сложных условиях, в случаях, когда контраст интерференционных полос на голограмме низкий и восстановленное распределение поля промодулировано шумами, что приводит к образованию сингулярных точек в распределении фазы, затрудняющих процедуру ликвидации разрывов. Так, данный алгоритм был апробирован в эксперименте по исследованию динамического изменения пространственного распределения показателя преломления раствора фотосенсибилизатора «Радахлорин®» в дистиллированной воде, под действием лазерного излучения мощностью 50 мВт с длиной волны 405 нм, попадающей в полосу поглощения данного сенсибилизатора.

В качестве источника зондирующего излучения использовался He-Ne лазер, излучение которого практически не поглощалось исследуемым раствором. Возбуждающее лазерное излучение направлялось перпендикулярно оптической оси зондирующего излучения, сверху, через границу раздела двух сред. Для регистрации цифровых голограмм использовалась цифровая фотокамера «Видеоскан-2-205» с размером пикселя 4,65 мкм, позволяющая регистрировать до 7 кадров/с. Исследуемая плоскость, расположенная в середине кюветы с раствором сенсибилизатора, проецировалась на фотосенсор камеры с помощью телескопической системы с коэффициентом увеличения  $M = 1/3$ . Использование 4f системы также избавило от необходимости применения дополнительной процедуры распространения восстановленного волнового фронта из плоскости регистрации в плоскость объекта, которая не является необходимой для используемого нами метода восстановления [12].

В качестве опорного пучка использовался плоский волновой фронт, который с помощью светоделительного кубика совмещался с объектным пучком под углами  $0,55^\circ$  и  $2,05^\circ$  по горизонтали и вертикали соответственно. Ввиду неидеальной юстировки телескопической системы восстановленный зондирующий волновой

фронт, прошедший через раствор до его нагрева возбуждающим лазерным излучением, отличался от плоского (рис. 3а). Однако кривизной волнового фронта в данном эксперименте можно было пренебречь, поскольку интерес представляет лишь приобретаемый вследствие нагрева фазовый набег. Из-за слабого контраста интерференционных полос, имеющего место в некоторых зарегистрированных голограммах, обусловленного недостаточной виброизоляцией экспериментальной установки, в восстановленных из них пространственных распределениях фазы присутствовало большое количество шума (рис. 3б). В таком случае использование обычной процедуры вычитания разности фазовых распределений требует применения специальных алгоритмов подавления шумов перед процедурой ликвидации фазовых разрывов. Применение же предлагаемого метода позволяет получить пространственное распределение разности фаз, невзирая на имеющиеся в них шумы и кривизну волнового фронта (рис. 3в, г).

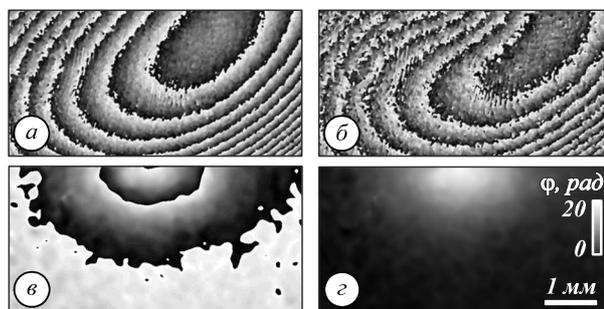


Рис. 3. Пространственные распределения фазы: восстановленные с экспериментально зарегистрированных голограмм: до нагрева возбуждающим лазерным излучением (а) и в процессе нагрева, на 8-й секунде (б); пространственные распределения разности фаз, полученные в результате использования предложенного метода: в диапазоне  $(-\pi, \pi)$  (в) и абсолютное, полученное из (в) с использованием алгоритма [15] (г)

Для демонстрации преимуществ использования представленного алгоритма обработки в случаях низких соотношений сигнал/шум был проведён ряд численных экспериментов. В ходе этих экспериментов моделировались цифровые голограммы, соответствующие волновым фронтам с фазовыми распределениями, отличающимися на величину некоторого заранее известного плавного возмущения сферической формы. Затем к таким голограммам добавлялся шум, характеризующийся Гауссовым распределением на гистограмме. Полученные данные обрабатывались предложенным выше алгоритмом, а также, для сравнения, ещё и методом единичных фазовых шагов [9]. Для получения итогового распределения фазы в абсолютных значениях из полученной разности использовался алгоритм ликвидации фазовых разрывов [15]. Пример полученных двумя методами распределений разности фаз показан на рис. 4а, б. Количественно качество восстановления фазы определялось путём вычисления нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) [16] восстановленной фазы от исходной. Как видно из графика, представленного на

рис. 4в, показывающего поведение сравниваемых методов при различных уровнях шума, при высоком соотношении сигнал/шум качество восстановления фазы обоих методов отличаются незначительно. Однако в случае восстановления сильно зашумлённых цифровых голограмм предложенный метод обладает значительными преимуществами, что выражается в более низкой НСКО. Стоит отметить, что основной причиной резкого увеличения НСКО при использовании метода [9] являются участки фазового распределения, на которых фазовые разрывы не удалось устранить в результате применения процедуры развёртки [15].

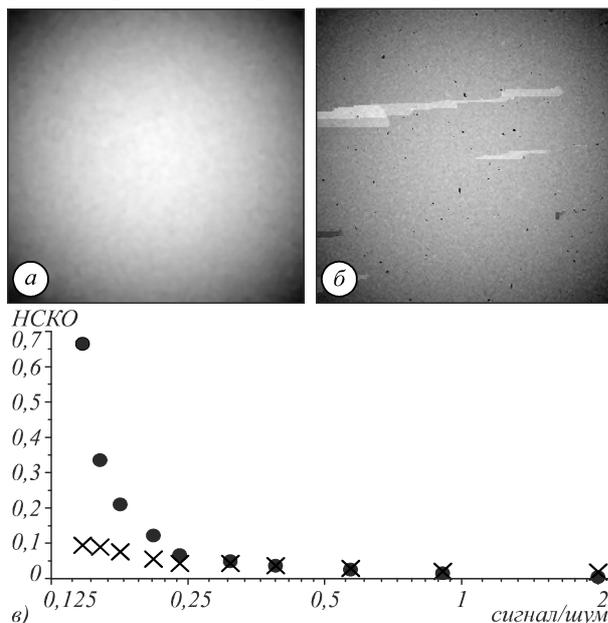


Рис. 4. Результат восстановления возмущения в абсолютных значениях при уровне сигнал/шум 0,17 при использовании предложенного алгоритма (а), метода [9] (б), зависимость качества восстановления фазы от уровня шумов при использовании алгоритма, предложенного в данной работе (маркеры в виде крестов) и метода, описанного в статье [9] (маркеры в виде точек) (в). Ось  $x$  представлена в логарифмическом масштабе

### Заключение

Таким образом, предложенный в данной работе метод позволяет вычислять разность двух произвольных фазовых распределений без предварительного применения процедуры ликвидации имеющихся в них фазовых разрывов. Также было показано, что получаемая в результате применения предложенного метода цифровая интерферограмма в полосах конечной ширины может быть восстановлена с помощью метода восстановления комплексной амплитуды поля из внеосевых голограмм. Данный метод может быть востребован в условиях низкого отношения сигнал/шум.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-13-00266. Авторы благодарят компанию «Радафарма» за предоставленный для проведения экспериментов фотосенсибилизатор «Радахлорин»®.

### Литература (References)

1. **Schedin, S.** Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography / S. Schedin, G. Pedrini, H.J. Tiziani, F.M. Santoyo // *Applied Optics*. – 1999. – V. 38(34). – P. 7056-7062.
2. **Osten, W.** Comparative digital holography / W. Osten, T. Baumbach, W. Jüptner // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27(20). – P. 1764-1766.
3. **Pedrini, G.** Pulsed digital holography for high-speed contouring that uses a two-wavelength method / G. Pedrini, P. Fröning, H.J. Tiziani, M.E. Gusev // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38(16). – P. 3460-3467.
4. **Yu, L.** Digital holographic microscopy for quantitative cell dynamic evaluation during laser microsurgery / L. Yu, S. Mohanty, J. Zhang, S. Genc, M.K. Kim, M.W. Berns, Z. Chen // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(14). – P. 12031-12038.
5. **Ghiglia, D.** Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software / D. Ghiglia, M. Pritt – New York: Wiley-Interscience. 1998. – 493 p.
6. **Desse, J.M.** Digital three-color holographic interferometry for flow analysis / J.M. Desse, P. Picart, P. Tankam // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(8). – P. 5471-5480.
7. **Yu, Q.** Single-phase-step method with contoured correlation fringe patterns for ESPI / Q. Yu, S. Fu, X. Liu, Y. Xia, X. Sun // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(20). – P. 4980-4985.
8. **Kerr, D.** Extraction of phase data from electronic speckle pattern interferometric fringes using a single-phase-step method – a novel approach / D. Kerr, F.M. Santoyo, J.R. Tyrer // *Journal of the Optical Society A*. – 1990. – Vol. 7(5). – P. 820-826.
9. **Santoyo, F.M.** Interferometric fringe analysis using a single phase step technique / F.M. Santoyo, D. Kerr, J.R. Tyrer. // *Applied Optics*. – 1988. – Vol. 27. – P. 4362-4364.
10. **Вест, Ч.** Голографическая интерферометрия / Ч. Вест; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 504 с. (**Vest, C.M.** *Holographic Interferometry*. – N.Y.: Wiley Interscience, 1979.)
11. **Baumbach, T.** Remote metrology by comparative digital holography / T. Baumbach, W. Osten, C. Kopylow, W. Jüptner // *Applied Optics*. – 2006. – Vol. 45(5). – P. 925-934.
12. **Liebling, M.** Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram / M. Liebling, T. Blu, M. Unser // *Journal of the Optical Society A*. – 2004. – Vol. 21(3). – P. 367-377.
13. **Almazan-Cuellar, S.** Two-step phase-shifting algorithm / S. Almazan-Cuellar, D. Malacara-Hernandez // *Optical Engineering*. – 2003. – Vol. 42(12). – P. 3524-3531.
14. **Налимов, А.Г.** Определение шероховатости поверхности с помощью поля направлений / А.Г. Налимов, В.В. Котляр, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2003. – Т. 25. – С. 71-73. (**Nalimov, A.G.** *Determination of surface roughness with field directions* / A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2003. – Vol. 25. – P. 71-73 – (In Russian).)
15. **Goldstein, R.M.** Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping / R.M. Goldstein, H.A. Zebken, C.L. Werner // *Radio Science*. – 1988. – Vol. 23(4). – P. 713-720.
16. **Fienu, J.R.** Invariant error metrics for image reconstruction / J.R. Fienu // *Applied Optics*. – 1997. – Vol. 36(32). – P. 8352-8357.

## METHOD FOR CALCULATING THE DYNAMIC PHASE DELAY IN HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY WITHOUT PHASE UNWRAPPING

A.V. Belashov<sup>1,2</sup>, N.V. Petrov<sup>1</sup>, I.V. Semenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University ITMO (National Research University),

<sup>2</sup> Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

### Abstract

A method for calculating the difference between two arbitrary spatial phase distributions reconstructed from digital holograms is presented. The method is promising for application in double-exposure digital holographic interferometry, especially for the evaluation of phase variations in heavily noised or speckle-structure-modulated digital holograms, because it does not use the phase unwrapping procedure for each reconstructed spatial phase distribution. Instead, by analogy with classical double-exposure holographic interferometry, an interference pattern formed by two reconstructed object waves is calculated first. The interferogram thus obtained is then processed as a digital hologram by the same method that was used for reconstruction of physically recorded holograms. The advantages of the proposed method are demonstrated by both by the numerical computation of the difference of the phase distributions of speckle-structure-modulated wavefronts and the experimental observation of the laser-induced temperature gradients in an aqueous solution of a photosensitizer.

**Key words:** digital holography, dynamic interferometry, phase retrieval, speckle structure, phase unwrapping.

### Сведения об авторах



**Белашов Андрей Владимирович**, 1993 года рождения, в 2014 году окончил бакалавриат Санкт-Петербургского политехнического университета по направлению «Физика твёрдого тела» и поступил в Научно-исследовательский университет информационных технологий механики и оптики на факультет фотоники и оптоинформатики. Область научных интересов: цифровая голография, голографическая интерферометрия.

E-mail: [Belashov.Andrey.93@gmail.com](mailto:Belashov.Andrey.93@gmail.com).

**Andrei Vladimirovich Belashov**, (b. 1993) graduated from Saint-Petersburg Polytechnical University in 2014, with bachelor's degree in Solid-state Physics. Currently he is studying at t of Photonics and Optical Information Technology departmen of University ITMO. Research interests are digital holography and holographic interferometry.



**Петров Николай Владимирович**, 1983 года рождения. В 2007 году получил степень магистра по направлению «Физика» в Санкт-Петербургском государственном университете. В 2011 году получил степень кандидата физико-математических наук. Работает старшим научным сотрудником и доцентом на кафедре фотоники и оптоинформатики в Университете ИТМО. Область научных интересов: оптическая голография, фемтосекундная оптика, компьютерная оптика.

E-mail: [N.Petrov@phoi.ifmo.ru](mailto:N.Petrov@phoi.ifmo.ru).

**Nikolay Vladimirovich Petrov** (b. 1983) received a master's degree in Physics from Saint-Petersburg State University in 2007, received a PhD in Physics and Mathematics in 2011. He works as senior researcher and associate professor at Photonics and Optical Information Technology department of University ITMO. His research interests are currently focused on optical holography, femtosecond optics and computer optics.



**Семенова Ирина Владимировна**, научный сотрудник ФТИ им. Иоффе РАН, специалист в области голографии, голографической интерферометрии быстропротекающих процессов, применения голографических методов регистрации биологических процессов, голографических оптических материалов. Автор более 100 научных работ в области голографии.

E-mail: [irina.semenova@mail.ioffe.ru](mailto:irina.semenova@mail.ioffe.ru).

**Irina Vladimirovna Semenova**, staff scientist at the Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences; a specialist in holography, holographic interferometry of fast processes, holographic recording of biological phenomena, holographic optical elements; an author of more than 100 papers in the field of holography.

Поступила в редакцию 13 августа 2014 г.