

## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.411.854

### АЛГОРИТМ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН СО СЛУЧАЙНЫМИ ФАЗОВЫМИ СДВИГАМИ\*

В.И. ГУЖОВ<sup>1</sup>, С.П. ИЛЬИНЫХ<sup>2</sup>, Д.С. ХАЙДУКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных. E-mail: vig@edu.nstu.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: ilinyx@corp.nstu.ru

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных кафедры автоматизации. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com.

Алгоритмы анализа интерференционной структуры на основе фазовых сдвигов широко используются при создании интерференционных измерительных систем. Метод фазового сдвига основан на получении интерференционной структуры при изменении фазы опорной волны на известные значения. Точность существующих алгоритмов анализа зависит от точности установки фазовых сдвигов. Однако, на практике сложно определить точное значение фазового сдвига из-за ошибки фазосдвигающего устройства. В этой статье описывается новый алгоритм для расшифровки интерференционных картин со случайными фазовыми сдвигами. Алгоритм основан на анализе траектории интерференции сигналов с использованием метода главных компонент. Алгоритм использует три интерференционные картины с произвольными фазовыми сдвигами для нахождения разности фаз между опорным и объектным волновыми фронтами. Корректность работы алгоритма проверялась путем расшифровки синтезированных и экспериментальных интерферограмм. С этой целью были синтезированы три интерферограммы с известными фазовыми сдвигами, которые потом расшифровывались по предлагаемому в статье алгоритму. Точность расшифровки в этом случае получается не хуже, чем при расшифровке с известными фазовыми сдвигами. При расшифровке интерферограмм, полученных экспериментально, точность расшифровки получается значительно выше, так как истинную величину вносимых фазовых сдвигов достаточно трудно определить по реальным интерферограммам из-за наличия шумов и искажения профилей интерференционных полос. Отметим, что

---

\* Статья получена 1 июля 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 14-08-01100. Тема гранта «Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов».

предложенный в статье алгоритм достаточно устойчив к шумам и искажению профиля интерференционных полос, что обусловлено тем, что в данном алгоритме не производится оценка величины вносимых фазовых сдвигов, как это делается в традиционных алгоритмах.

**Ключевые слова:** цифровая интерферометрия, оптическая измерительная система, интерферограмма, оптическая интерферометрия, цифровая голографическая интерферометрия, фазовый сдвиг, интерферометр, программное обеспечение, траектория интерференционных сигналов, метод главных компонент, синтез тестов, экспериментальная проверка

DOI: 10.17212/2307-6879-2014-4-79-96

## ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактное измерение профиля поверхности, основанное на принципах фазовых сдвигов в интерферометрии, цифровой голографической интерферометрии, методах проецирования синусоидальных полос и т. д., является современной областью исследований и широко отражено в научных публикациях [1–12]. Интерференционные картины, регистрируемые в процессе измерений, содержат большой объем информации, которая должна быть обработана и расшифрована для получения качественных и количественных оценок.

Это требует наличия соответствующих компьютерных систем и программного обеспечения для получения, преобразования и обработки информации. Программное обеспечение используется для расшифровки интерференционных картин и представления результатов в соответствующей форме.

Интерференционные измерительные системы состоят из интерферометра, камеры для регистрации интерференционных картин и системы обработки данных. Принцип действия интерферометра заключается в следующем. Пучок электромагнитного излучения от лазера пространственно разделяется на два когерентных пучка с помощью делительного куба. Первый пучок отражается от измеряемого объекта, второй пучок – от опорного зеркала. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и возвращается на экран, создавая интерференционную картину (интерферограмму). На рис. 1 показана упрощенная схема интерферометра Тваймана-Грина [13].

Зарегистрированные интерференционные картины используются для восстановления поверхности измеряемого объекта, что является задачей восстановления фазы интерференционных картин.

С математической точки зрения задача восстановления фазы заключается в определении значений разности фаз интерферирующих волновых фронтов по измеренным значениям интенсивности зарегистрированных интерференционных картин.

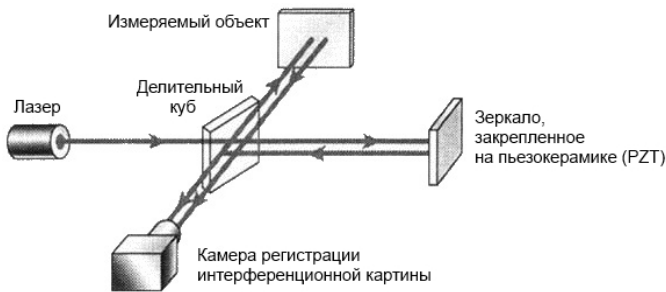


Рис. 1. Схема интерферометра Тваймана-Грина

При построении интерференционных измерительных систем широко используются методы анализа интерференционных картин, основанные на фазовых сдвигах [14]. Метод фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известные значения.

Интенсивность интерферограммы в точке  $(x, y)$  с различными фазовыми сдвигами  $\delta_i$ :

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_i)], \quad (1)$$

где  $I_0(x, y)$  – средняя яркость;  $V(x, y)$  – видимость интерференционных полос;  $\varphi(x, y)$  – разность фаз между интерферирующими волновыми фронтами,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  – число фазовых сдвигов.

Для определения разности фаз существуют формулы расшифровки. Если фазовые сдвиги одинаковы в диапазоне  $0 \dots 2\pi$ , то разность фаз  $\varphi$  может быть вычислена как

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^n I_i \sin \delta_i \right)}{\left( \sum_{i=1}^n I_i \cos \delta_i \right)} \right]. \quad (2)$$

Разность фаз может быть вычислена с использованием трех произвольных фазовых сдвигов:

$$\varphi = \arctg \frac{(I_2 - I_3) \sin(\delta_1) + (I_3 - I_1) \sin(\delta_2) + (I_1 - I_2) \sin(\delta_3)}{(I_3 - I_2) \cos(\delta_1) + (I_1 - I_3) \cos(\delta_2) + (I_2 - I_1) \cos(\delta_3)}. \quad (3)$$

Точность существующих алгоритмов расшифровки зависит от точности установки вносимых фазовых сдвигов. Однако на практике трудно определить точные значения фазовых сдвигов из-за ошибок фазосдвигающих устройств.

Данная работа посвящена алгоритму расшифровки интерференционных картин с тремя случайными фазовыми сдвигами. Сущность алгоритма заключается в преобразовании траектории интерференционных сигналов (интенсивностей) со случайными фазовыми сдвигами к траектории сигналов, чьи фазовые сдвиги известны точно.

## 1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Предположим, существуют три интерференционные картины с фазовыми сдвигами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  (рис. 2).

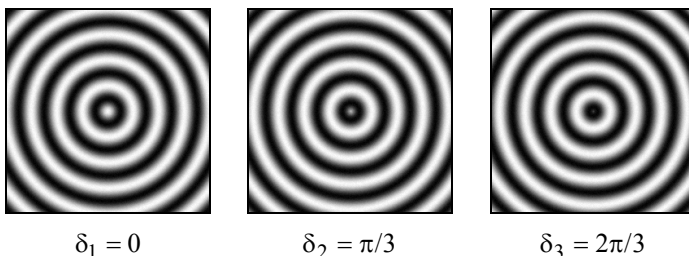


Рис. 2. Интерференционные картины с разными фазовыми сдвигами

На первом шаге алгоритма создаются векторы интенсивностей для каждой точки интерференционной картины. Эти векторы содержат значение интенсивности в конкретной точке интерференционной картины с различными фазовыми сдвигами. Пусть  $I_1(x, y)$  – значение интенсивности в точке  $(x, y)$  первой интерференционной картины;  $I_2(x, y)$  – значение интенсивности в точке  $(x, y)$  второй интерференционной картины;  $I_3(x, y)$  – значение интенсивности в точке  $(x, y)$  третьей интерференционной картины. Тогда вектор интенсивностей для точки  $(x, y)$  интерференционной картины будет  $I(x, y) = [I_1(x, y); I_2(x, y); I_3(x, y)]$ .

Затем вычисляются ортогональные векторы для каждого вектора интенсивностей. Ортогональный вектор может быть вычислен следующим образом [14]:

$$\mathbf{I}^\perp = \mathbf{M} \cdot \mathbf{I}. \quad (4)$$

Матрица преобразования  $M$  должна удовлетворять следующим условиям:

$$|M| = 0, M \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T = 0. \quad (5)$$

Вычисленные ортогональные векторы будут иметь такую же размерность, как и вектор интенсивностей, т. е. содержать три компоненты. На рис. 3 показана траектория ортогональных векторов в пространстве интенсивностей.

Координаты каждой точки на рис. 3 есть элементы соответствующего ортогонального вектора. Форма и расположение облака точек зависит от фазовых сдвигов для интерференционных картин.

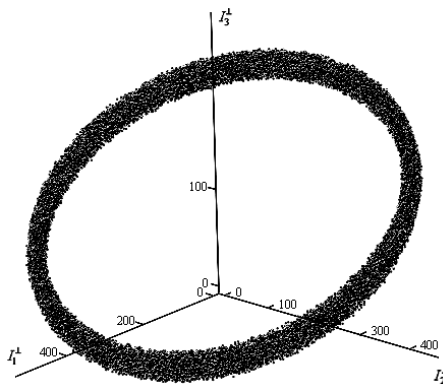


Рис. 3. Траектория ортогональных векторов в пространстве интенсивностей

В силу свойств ортогональных векторов все точки в пространстве интенсивностей будут расположены в одной плоскости. Это позволяет уменьшить размерность задачи. Полученное облако точек вращается таким образом, чтобы оно было параллельно координатной плоскости  $XU$  (рис. 4). Затем точки облака проецируются на координатную плоскость  $XU$ .

Далее, для полученного облака точек с использованием метода главных компонент [15] определяются основные оси. Для этого составляется ковариационная матрица следующего вида:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n xy \\ \sum_{i=1}^n xy & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $n$  – общее количество точек на координатной плоскости;  $y_i$  – координата  $Y$  для  $i$ -й точки;  $x_i$  – координата  $X$  для  $i$ -й точки на плоскости.

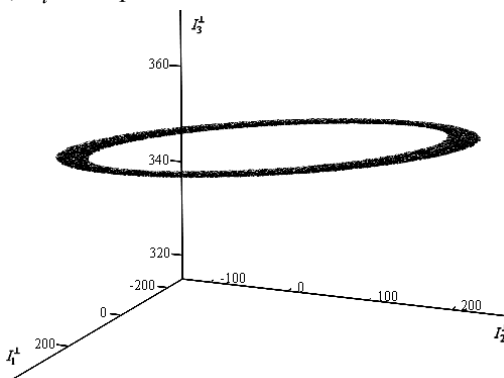


Рис. 4. Траектория ортогональных векторов, приведенных к координатной плоскости

Далее для ковариационной матрицы  $\mathbf{Q}$  вычисляются собственные значения и соответствующие им собственные векторы [16]. Если матрицу  $\mathbf{Q}$  представить в виде

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

то собственные значения можно вычислить с использованием следующих формул:

$$\lambda_1 = \frac{q_{11} + q_{22}}{2} - \frac{\sqrt{(q_{11})^2 - 2q_{11}q_{22} + 4q_{12}q_{12} + (q_{22})^2}}{2}, \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \frac{q_{11} + q_{22}}{2} + \frac{\sqrt{(q_{11})^2 - 2q_{11}q_{22} + 4q_{12}q_{12} + (q_{22})^2}}{2}. \quad (9)$$

Вектор  $\mathbf{R}$ , соответствующий собственному значению  $\lambda$ , будет

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{q_{11} + q_{12} - \lambda}{q_{12} + q_{22} - \lambda} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Собственный вектор, соответствующий минимальному собственному значению, будет определять меньшую главную ось. На рис. 5 отображены спроецированное на координатную плоскость облако точек и направления основных осей, найденные с использованием метода главных компонент.

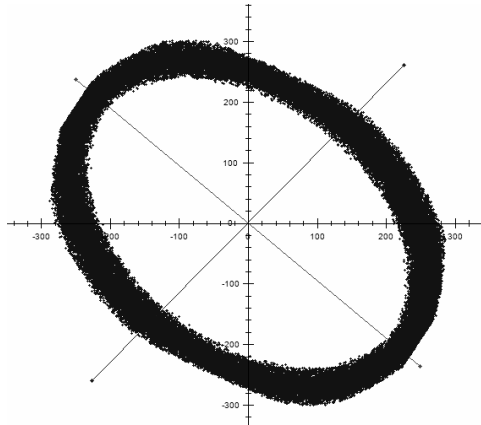


Рис. 5. Определение основных осей с использованием метода главных компонент

На следующем шаге необходимо облако точек в пространстве (в идеальном случае представляющее эллипс) вписать в цилиндр. Для этого необходимо определить направляющую цилиндра.

Пусть  $\lambda_1$  – минимальное собственное значение,  $\lambda_2$  – максимальное собственное значение. Тогда направляющая цилиндра, в который будет вписан эллипс, имеет следующую форму:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) \\ -\sin(\Omega) \\ h \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $\Omega$  – угол между положительным направлением оси  $X$  и меньшей главной осью. Третий компонент вектора  $h$  определяется следующим образом.

$$a = \sqrt{\lambda_1}, \quad b = \sqrt{\lambda_2}, \quad (12)$$

$$h = \frac{a}{\sqrt{b^2 - a^2}}. \quad (13)$$

Затем траектория интенсивностей может быть преобразована к круговой траектории с использованием направляющей цилиндра, в который вписывается эллипс. Каждая точка траектории интенсивностей проецируется вдоль направляющей цилиндра на плоскость, которая параллельна основанию цилиндра. Преобразование выполняется следующим образом. Пусть  $P(x, y, z)$  – точка эллипса в пространстве для исходной траектории. Тогда новая точка  $G(x_1, y_1, z_1)$  на круговой траектории в векторном виде вычисляется с использованием формулы

$$G = P - \mathbf{L}(\mathbf{L}P) \left( \frac{1}{\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}} \right) \quad (14)$$

или в координатной форме

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \mathbf{L} \left( \mathbf{L} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) \left( \frac{1}{\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}} \right). \quad (15)$$

Таким образом, выполняется преобразование исходной траектории к круговой. На рис. 6 показан результат преобразования к круговой траектории. Все точки круговой траектории будут расположены в одной плоскости, параллельной основанию цилиндра.



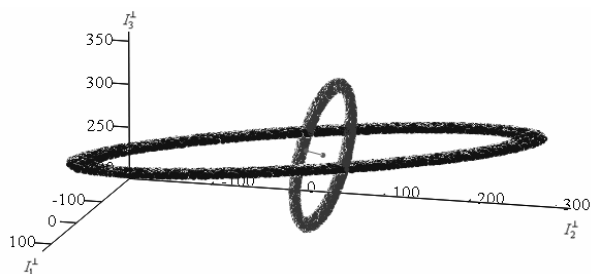


Рис. 6. Преобразование к круговой траектории (проецирование вдоль направляющей цилиндра)

На заключительном шаге алгоритма произвольно-ориентированная круговая траектория поворачивается параллельно координатной плоскости  $XU$ , затем точки круговой траектории проецируются на плоскость. Для каждой точки круговой траектории на плоскости вычисляется угол, который и будет представлять фазу в точке интерференционной картины, соответствующей данной точке на круговой траектории. Угол вычисляется с использованием формулы

$$\varphi = \arctg\left(\frac{x}{y}\right), \quad (16)$$

где  $\varphi$  – искомая фаза,  $x$  и  $y$  – значения координат точки круговой траектории на плоскости.

## 2. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки предложенного алгоритма были сгенерированы интерференционные картины размером  $300 \times 300$  пикселей. На рис. 7 показаны модельные интерференционные картины со случайными фазовыми сдвигами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ . На рис. 9 показано распределение фазы по всему полю, соответствующее модельным интерференционным картинам.

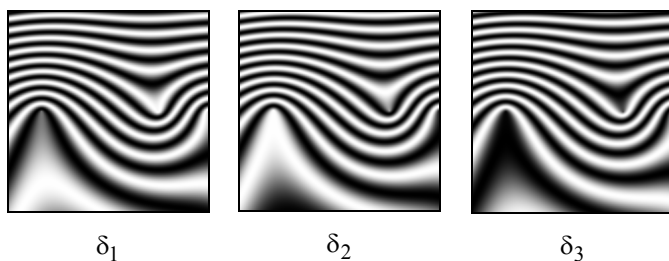


Рис. 7. Модельные интерференционные картины с различными случайными фазовыми сдвигами

Профиль для горизонтального сечения интерференционной картины со сдвигом  $\delta_1$  показан на рис. 8.

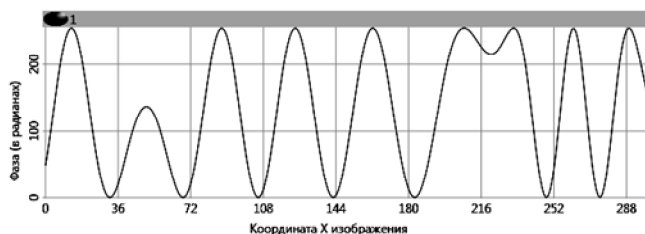


Рис. 8. Профиль сечения одной из интерферограмм

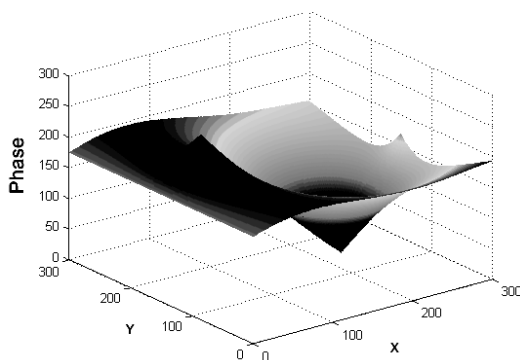


Рис. 9. Распределение фазы по всему полю

На рис. 10 показаны развернутая реальная фаза (1) и фаза, вычисленная с использованием предложенного алгоритма (2), для одной строки изображения, которые практически совпали.

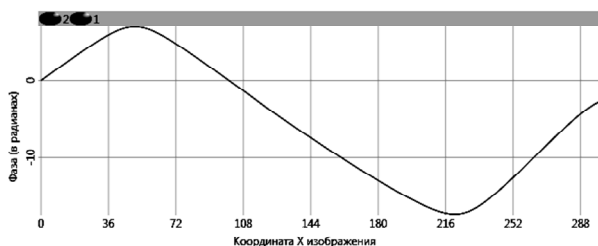


Рис. 10. Развернутая реальная (1) и вычисленная (2) фазы для строки изображения

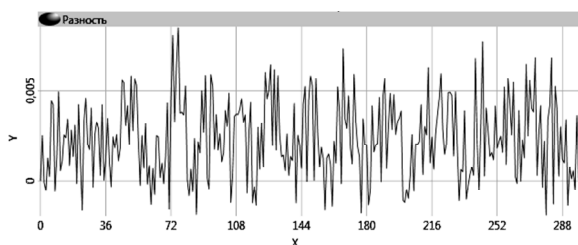
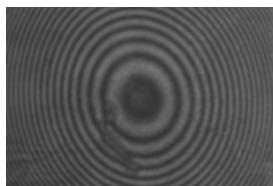


Рис. 11. Разность между реальной и вычисленной фазами

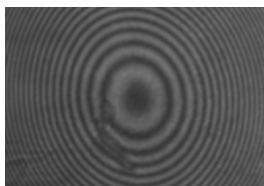
Разность между реальной и вычисленной фазами для той же строки изображения приведена на рис. 11.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

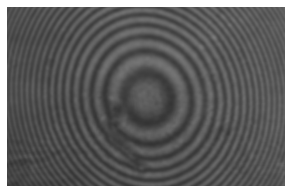
На рис. 12 показаны экспериментальные интерференционные картины размером  $1280 \times 880$  с внесенными произвольными фазовыми сдвигами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ .



$\delta_1$



$\delta_2$



$\delta_3$

Рис. 12. Экспериментальные интерференционные картины

На рис. 13 показан профиль поля интенсивности в среднем сечении экспериментальной интерференционной картины.

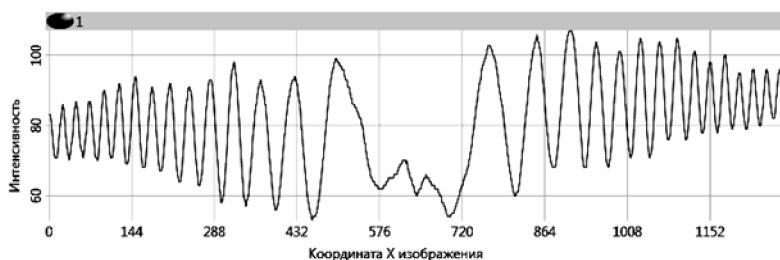


Рис. 13. Профиль поля интенсивности в среднем сечении экспериментальной интерференционной картины со сдвигом  $\delta_1$

Для расшифровки экспериментальных интерференционных картин воспользуемся двумя способами. В первом способе оценим углы, соответствующие интерференционным картинам, и воспользуемся классической формулой расшифровки. Во втором способе используем приведенный алгоритм расшифровки.

Обозначим матрицы, представляющие интенсивности экспериментальных интерференционных картин, соответственно  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

Оценим углы сдвига для интерференционных картин. Пусть  $\delta_1 = 0$ , тогда  $\delta_2 = a \cos(\text{corr}(A_1, A_2))$ ;  $\delta_3 = \delta_2 + a \cos(\text{corr}(A_2, A_3))$ .

Оператор  $\text{corr}(A, B)$  вычисляет коэффициент корреляции Пирсона элементов матриц  $A$  и  $B$ .

На рис. 14 приведена вычисленная по всему полю фаза с использованием трехточечной классической формулы расшифровки с оценкой фазовых сдвигов [17].

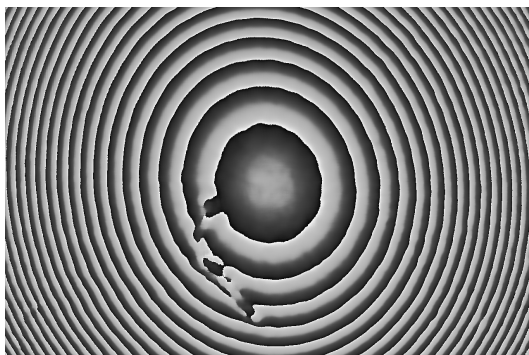


Рис. 14. Расшифровка по всему полю интерферограммы с использованием оцененных углов

На рис. 15 приведена вычисленная свернутая фаза по всему полю с использованием предложенного алгоритма расшифровки.

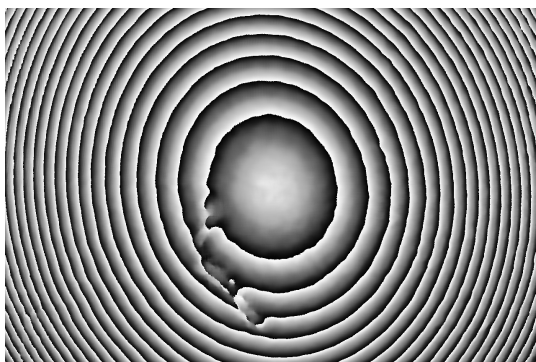


Рис. 15. Расшифровка интерферограммы с использованием предложенного алгоритма

На рис. 16 отображена развернутая вычисленная фаза по классическому алгоритму расшифровки с оцененными фазовыми сдвигами и по предложенному алгоритму расшифровки для среднего сечения интерференционной картины.

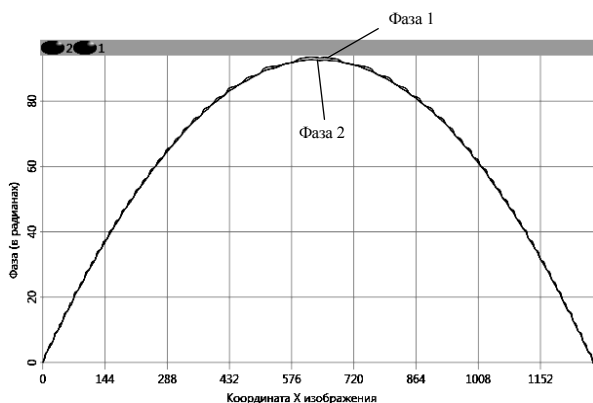


Рис. 16. Развернутая фаза, вычисленная по классическому алгоритму расшифровки (1) и по предложенному алгоритму (2)

На рис. 17 приведена разность фаз, показанных на рис. 16.

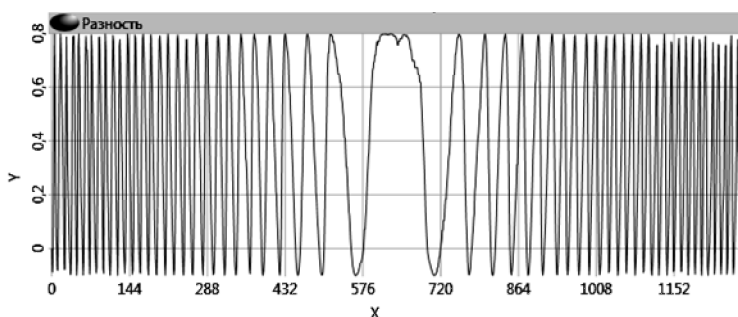


Рис. 17. Разность между фазой, вычисленной по классическому алгоритму, и фазой, вычисленной по предложенному алгоритму

Таким образом, предложенный алгоритм расшифровки для экспериментальных интерференционных картин показывает лучшие результаты по сравнению с классическим алгоритмом расшифровки, в котором производится оценка величины фазовых сдвигов.

## ВЫВОДЫ

Предложенный алгоритм позволяет вычислить фазу интерференционной картины с использованием только трех интерференционных картин с неизвестными фазовыми сдвигами. Фазовые сдвиги могут быть внесены, например, вибрациями измерительной системы во время измерений, что позволяет упростить конструкцию измерительной системы, исключая устройство управления фазовыми сдвигами. Точность алгоритма сопоставима с точностью обычных алгоритмов анализа, которые требуют знания точных значений фазовых сдвигов. Результаты экспериментального и модельного эксперимента демонстрируют высокую устойчивость алгоритма к шумам. Алгоритм может использоваться для восстановления фазовой информации в измерительных системах различного назначения, в том числе в цифровых голографических системах. Особенностью алгоритма является отсутствие итерационных процедур, что позволяет эффективно использовать его при параллельных вычислениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital micromirror transient response influence on superfast 3d shape measurement / Y. Wang, B. Bhattacharya, E.H. Winer, P. Kosmicki, W.H. El-Ratal, S. Zhang // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – P. 19–26.
2. A three-step least-squares iterative method for tilt phase-shift interferometry / Q. Liu, Y. Wang, F. Ji, J. He // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 29505–29515.
3. Fiber optic nterferometer fringe projector using sinusoidal phase-modulating / C. Lv, F. Duan, F. Zhang, X. Duan, E. Bo, F. Feng // *Proceedings SPIE, Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, August 08, 2013. – Guiyang, China, 2013. – Vol. 8916. – P. 89160V.
4. Katkovnik V., Bioucas-Dias J., Hao H. Wavefront reconstruction from noisy fringe observations via sparse coding // *The 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology*, Nürtingen, Germany, 8–11 September, 2013. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2014. – P. 179–184. – doi: 10.1007/978-3-642-36359-7\_24.
5. Wyant J.C. Computerized interferometric surface measurements // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52. – P. 1–8.
6. Nyakang'o O.E., Rurimo G.K., Karimi P.M. Optical phase shift measurements in interferometry // *International Journal of Optoelectronic Engineering*. – 2013. – Vol. 3, iss. 2. – P. 13–18. – doi: 10.5923/j.ijoe.20130302.01.

7. Interferometry: research and applications in science and technology / I. Padron, ed. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – 462 p. – ISBN 978-953-51-0403-2.
8. Sinusoidal phase-modulating interferometer insensitive to intensity modulation of a laser diode for displacement measurement / B. Wang, X. Wang, O. Sasaki, Z. Li // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, iss. 12. – P. 1939–1944.
9. *Chao Z., Fa-Jie D.* Phase stepping methods based on ptdc for fiber-optic projected-fringe digital interferometry // *Optics and Laser Technology*. – 2012. – Vol. 44, iss. 4. – P. 1089–1094.
10. *Desse J.M.* Advanced holography – metrology and imaging / Ed. by I. Naydenova. – 1st ed. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – 338 p.
11. *Šulc M.* Interferometer based methods for research of piezoelectric materials // *Interferometry principles and applications*. – New York: Nova Science Publisher, 2011. – P. 00021–1–00021–6.
12. *Meneses-Fabian C., Rivera-Ortega U.* Phase-shifting interferometry by wave amplitude modulation // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36. – P. 2417–2419.
13. *Twyman F.* British Patent 130.224. Camera lens. – 1919.
14. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry / V. Guzhov, S. Ilinykh, R. Kuznetsov, D. Haydukov // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52, iss. 3. – P. 030501–1–030501–2.
15. *Gorban A.N., Sumner N.R., Zinovyev A.Y.* Beyond the concept of manifolds: principal trees, metro maps, and elastic cubic complexes // *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction* / A.N. Gorban et al (eds.). – Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. – P. 219–237. – (Lecture Notes in Computational Science and Engineering; vol. 58). – doi: 10.1007/978-3-540-73750-6\_9.
16. *Korn G.A., Korn T.M.* Mathematical handbook for scientists and engineers. – Second ed. – New York: Dover, 2000. – 1152 p.
17. Phase-shift extraction for generalized phase-shifting interferometry / P. Gao, B. Yao, N. Lindlein, K. Mantel, I. Harder, E. Geist // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34, iss. 22. – P. 3553–3555.

**Гужов Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследования – оптические измерительные технологии. Имеет более 150 публикаций. E-mail: vig@edu.nstu.ru



**Ильиных Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – обработка измерительной информации. Имеет более 100 публикаций. E-mail: [ilinyx@corp.nstu.ru](mailto:ilinyx@corp.nstu.ru)

**Хайдуков Дмитрий Сергеевич** – магистр техники и технологии по специальности «Информатика и вычислительная техника» (аспирант кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета). Основное направление исследования – интерференционные измерительные системы. Имеет 12 публикаций. E-mail: [dmitriyhaydukov@gmail.com](mailto:dmitriyhaydukov@gmail.com)

## **The algorithm of the interference patterns with random phase shifts<sup>\*</sup>**

**V.I. Guzhov<sup>1</sup>, S.P. Ilinykh<sup>2</sup>, D.S. Huidukov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation D.Sc. (Eng.), professor department of systems for collecting and processing data. E-mail: [vig@edu.nstu.ru](mailto:vig@edu.nstu.ru)*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor of computer science. E-mail: [ilinyx@corp.nstu.ru](mailto:ilinyx@corp.nstu.ru)*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of systems for collecting and processing data. E-mail: [dmitriyhaydukov@gmail.com](mailto:dmitriyhaydukov@gmail.com)*

Algorithms for analyzing the interference pattern on the basis of the phase shifts, are used extensively in the interference measurement systems. Method of phase-shift based on the receipt of the interference pattern when the phase of the reference wave to the known values. The accuracy of the existing algorithms for analysis depends on the accuracy of the installation phase shifts. However, in practice it is difficult to determine the exact value of the phase shift due to an error on the phase shifter. This article describes a new algorithm for decoding the interference patterns with random phase shifts. The algorithm is based on the analysis of the trajectory of interference signals using the method of principal components. The algorithm uses three interference patterns with arbitrary phase shifts for finding the phase difference between the reference and object wavefronts. The correctness of the algorithm was verified by deciphering synthesized and experimental interferograms. To this end, three interferograms were synthesized with the known phase shifts, which are then decoded by the proposed algorithm in the article. Decoding accuracy in this case is not that worse than deciphering the known phase shifts. When interpreting the interference pat-

---

<sup>\*</sup> Received 1 July 2014.

The work was carried out with financial support of Russian Foundation for basic research under the grant № 14-08-01100. The subject of the grant "Digital holographic interferometry real-time experimental study of stress-strain state of dynamic object known".

terns obtained experimentally, the accuracy of decoding is considerably much better, as the true value of the phase shifts introduced quite difficult to pinpoint the real interferograms due to the presence of noise and distortion profiles of interference fringes. It should be noted that the proposed algorithm in the article quite robust to noise and distortion profile of interference fringes due to the fact that the algorithm is not performed estimate of the insertion phase shifts, as is done in traditional algorithms.

**Keywords:** digital interferometry, optical measuring system, interferogram, optical interferometry, digital holographic interferometry, phase shift interferometer, software, trajectory of the interference signals, method of principal components, synthesis tests, experimental verification

## REFERENCES

1. Wang Y., Bhattacharya B., Winer E.H., Kosmicki P., El-Ratal W.H., Zhang S. Digital micromirror transient response influence on superfast 3d shape measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 58, pp. 19–26.
2. Liu Q., Wang Y., Ji F., He J. A three-step least-squares iterative method for tilt phase-shift interferometry. *Optics Express*, 2013, vol. 21, pp. 29505–29515.
3. Lv C., Duan F., Zhang F., Duan X., Bo E., Feng F. Fiber optic interferometer fringe projector using sinusoidal phase-modulating. *Proceedings SPIE, Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, Guiyang, China, August 08, 2013, vol. 8916, pp. 89160V–89160V.
4. Katkovnik V., Bioucas-Dias J., Hao H. Wavefront reconstruction from noisy fringe observations via sparse coding. *The 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology*, Nürtingen, Germany, 8–11 September, 2013. Berlin, Heidelberg, Springer, 2014, pp. 179–184. doi: 10.1007/978-3-642-36359-7\_24
5. Wyant J.C. Computerized interferometric surface measurements. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, pp. 1–8.
6. Nyakang'o O.E., Rurimo G.K., Karimi P.M. Optical Phase Shift Measurements in Interferometry. *International Journal of Optoelectronic Engineering*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 13–18. doi: 10.5923/j.ijoe.20130302.01
7. Padron I., ed. *Interferometry: research and applications in science and technology*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012. 462 p. ISBN 978–953–51–0403–2.
8. Wang B., Wang X., Sasaki O., Li Z. Sinusoidal phase-modulating interferometer insensitive to intensity modulation of a laser diode for displacement measurement. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, iss. 12, pp. 1939–1944.

9. Chao Z., Fa-Jie D. Phase stepping methods based on ptcdc for fiber-optic projected-fringe digital interferometry. *Optics and Laser Technology*, 2012, vol. 44, iss. 4, pp. 1089–1094.
10. Desse J.M., Naydenova I., ed. Advanced holography – Metrology and imaging. 1st ed. Rijeka, Croatia, InTech, 2011. 338 p.
11. Šulc M. Interferometer based methods for research of piezoelectric materials. Interferometry principles and applications. New York, Nova Science Publisher, 2011, pp. 00021–1–00021–6.
12. Meneses-Fabian C., Rivera-Ortega U. Phase-shifting interferometry by wave amplitude modulation. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, pp. 2417–2419.
13. Twyman F. British Patent (camera lens) 130.224. 1919.
14. Guzhov V., Ilinykh S., Kuznetsov R., Haydukov D. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, iss. 3, pp. 030501–1–030501–2.
15. Gorban A.N., Sumner N.R., Zinovyev A.Y. Beyond the concept of manifolds: principal trees, metro maps, and elastic cubic complexes. *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer, 2007, vol. 58, pp. 223–241. doi: 10.1007/978-3-540-73750-6\_9
16. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical handbook for scientists and engineers. Second ed. New York, Dover, 2000, 1152 p.
17. Gao P., Yao B., Lindlein N., Mantel K., Harder I., Geist E. Phase-shift extraction for generalized phase-shifting interferometry. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, iss. 22, pp. 3553–3555.