

## Быстрый алгоритм расшифровки фазовых изображений с произвольным пошаговым сдвигом

*С. В. Двойнишников<sup>1\*</sup>, Д. В. Куликов<sup>1</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, В. Г. Главный<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: dv.s@mail.ru

**Аннотация.** Предложен численный алгоритм быстрого поиска начального фазового сдвига на фазовых изображениях с произвольными пошаговыми сдвигами. Алгоритм основан на поиске минимального отклонения модельной функции от результатов измерения. Метод интервального поиска, использованный непосредственно в предложенном подходе, позволил существенно снизить вычислительную сложность алгоритма. В работе представлены результаты измерения трехмерного профиля методами фазовой триангуляции с применением предложенного алгоритма. Полученные результаты подтверждают эффективность и высокую практическую ценность предложенного алгоритма расшифровки фазовых изображений.

**Ключевые слова:** фазовые изображения, алгоритм расшифровки, произвольный пошаговый сдвиг

## Fast algorithm for decoding phase images with arbitrary step shift

*S. V. Dvoynishnikov<sup>1\*</sup>, D. V. Kulikov<sup>1</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, V. G. Glavny<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: dv.s@mail.ru

**Abstract.** A numerical algorithm for fast search of the initial phase shift on phase images with arbitrary stepwise shifts is proposed. The algorithm is based on finding the minimum deviation of the model function from the measurement results. The interval search method used directly in the proposed approach made it possible to significantly reduce the computational complexity of the algorithm. The paper presents the results of measuring a three-dimensional profile by phase triangulation methods using the proposed algorithm. The obtained results confirm the efficiency and high practical value of the proposed phase image decoding algorithm.

**Keywords:** phase images, decoding algorithm, arbitrary stepwise shift

### *Введение*

Задача расшифровки фазовых изображений актуальна для широкого спектра задач в области оптической диагностики трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов [1–2]. В системах на основе триангуляции и структурированного освещения [3] либо интерферометрических системах [4] по фазовым изображениям восстанавливают трехмерный профиль измеряемого объекта.

Методы восстановления трехмерного профиля по фазовым изображениям активно развиваются и совершенствуются. Современное развитие методов фазовой триангуляции направлено на снижение времени измерения [5–7] для обеспе-

чения возможности измерения геометрии движущихся объектов [8–9], разработки быстрых и удобных методов калибровки [10–12] и увеличения точности измерения, с использованием различных методов и подходов [13].

Вычисление начального фазового сдвига выполняют по набору изображений, между которыми вносится известный сдвиг фазы. При этом, в случае, когда динамический диапазон фотоприемника не согласован с источником освещения и светорассеивающими свойствами, часть фазовых сдвигов содержат недостоверные результаты и не могут быть использованы в вычислении. Такая ситуация достаточно типична при измерении сложнопрофильных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности [14].

В результате задача расшифровки фазовых изображений сводится к определению величины фазового сдвига по набору измерений с произвольными сдвигами начальной фазы. Данную задачу решают методами на основе гармонической регрессии либо на основе векторного представления системы трансцендентных уравнений, описывающих зависимость наблюдаемой интенсивности на фазовых изображениях. Тем не менее, такие подходы обладают рядом недостатков: Они показывают нестабильную работу в условиях случайных помех и требуют значительных вычислительных ресурсов, которые можно оценить, как  $O(N^2)$ , где  $N$  – количество фазовых сдвигов.

В данной работе предложен алгоритм расшифровки фазовых изображений на основе численного поиска фазового сдвига, обладающий устойчивостью к шумам и большей вычислительной эффективностью.

### **Описание алгоритма**

Метод основан на итерационном поиске минимального отклонения модельной функции от результатов измерения. Экспериментальные данные, полученные в ходе измерения, имеют следующий вид:

$$I(x, y, i) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta(i)) + R(x, y, i), \quad i \in 1..N, \quad (1)$$

где  $I(x, y, i)$  – распределение интенсивности на  $i$ -м изображении контролируемого объекта;  $A(x, y)$  – распределение фоновой интенсивности;  $V(x, y)$  – средняя видность;  $\varphi(x, y)$  – искомое распределение разности фаз, кодирующее информацию дальности объекта;  $\delta(i)$  – вносимый сдвиг фазы между соседними изображениями структурированной засветки;  $R(x, y, i)$  – интенсивность аддитивных шумов, регистрируемых фотоприемником,  $N$  – число сдвигов.

Значение фазы  $\varphi(x, y)$  требуется находить для каждого значения пары координат на изображении  $(x, y)$ . Для упрощения можно рассматривать значение интенсивности в одной точке с координатами  $(x, y)$ :

$$I(i) = A(1 + V \cos(\varphi + \delta(i)) + R(i), \quad i \in 1..N. \quad (2)$$

Значение фазы  $\varphi$  вычисляем с помощью следующего алгоритма. Строим функцию  $G(i)$  :

$$G(i, \omega) = \sin(\omega + \delta(i)), \quad i \in 1..N. \quad (3)$$

Далее строим дискретную функцию зависимости  $G(I(i), \omega)$ , которая будет иметь форму эллипса и в случае  $\omega = \varphi$  будет приближаться к прямой линии.

Таким образом, для вычисления  $\omega \rightarrow \varphi$  нужно построить функционал  $E(\omega) \rightarrow 0$ :

$$E(\omega) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( Y(i, \omega) - \frac{\sum_{i=1}^N Y(i, \omega)}{N} \right)^2}, \quad (4)$$

$$Y(i, \omega) = I(i) - a(\omega) \cdot G(i, \omega) - b(\omega), \quad (5)$$

$$a(\omega) = \frac{I(i_{\min}) - I(i_{\max})}{G(i_{\min}, \omega) - G(i_{\max}, \omega)}, \quad (6)$$

$$b(\omega) = I(i_{\min}) - a(\omega)G(i_{\min}, \omega), \quad (7)$$

$$i_{\min} = i : \min(I(i)), \quad i_{\max} = i : \max(I(i)). \quad (8)$$

В результате вычисляем значение  $\omega$ , при котором функционал  $E(\omega)$  принимает минимальное значение.

Для быстрого поиска минимума функции  $E(\omega)$  был применен интервальный поиск: на каждом шаге алгоритма выбирался интервал, и на нем для 3 равноудаленных значений  $\omega$  вычислялись значения  $E(\omega)$ . Затем значение  $\omega$ , где  $E(\omega)$  было наименьшим, выбиралось за центр нового интервала, размер которого уменьшался вдвое по сравнению с предыдущим. В результате на 10-м шаге алгоритма получаем интервал размеров  $1/1024$  от диапазона изменения величины  $\omega$ , которая равна  $3,14$  радиан. В таком случае погрешность определения начальной фазы, обусловленная выбранным методом будет составлять менее  $0,1\%$  от диапазона измерений. При этом требуется выполнить вычисление функции  $E(\omega)$  всего для 30 значений  $\omega$ .

Вычислительную сложность такого подхода можно оценить как  $O(N \log(K))$ , где  $N$  – количество фазовых сдвигов на изображениях, а  $K$  – количество интервалов, на которых выполняется поиск. При  $N > 30$  и  $K = 1024$ , предлагаемый численный метод поиска значения фазы имеет меньшую вычислительную сложность, чем методы на основе аналитического решения системы трансцендентных уравнений.

## Практическое использование

Предложенный метод поиска фазового сдвига применен для расшифровки фазовых изображений при измерении трехмерного профиля головы манекена с характерными размерами  $200 \times 200 \times 200$  мм.

Измерительный комплекс содержит камеру imaginesource DMK 72BUC02 с объективом avenir 8 мм,  $f1.2$ , разрешением матрица 5 мп, цифровой LCD проектор LEJADA с адаптированной оптической системой, имеющей фокусное расстояние 40 – 70 см, обеспечивающий яркость излучения 1200 лм, разрешение  $1024 \times 768$ . Расстояние между источником и приемником излучения составляло 40 см, расстояние от измерительного модуля до объекта – 50 см.

Результаты измерения трехмерного профиля головы манекена представлены на рис. 1. Калибровка выполнялась с помощью плоской калибровочной мишени, располагаемой на различных расстояниях относительно  $OZ$ . По результатам калибровки формировался регрессионный массив на основе регрессии 2-го порядка, как описано в [15].

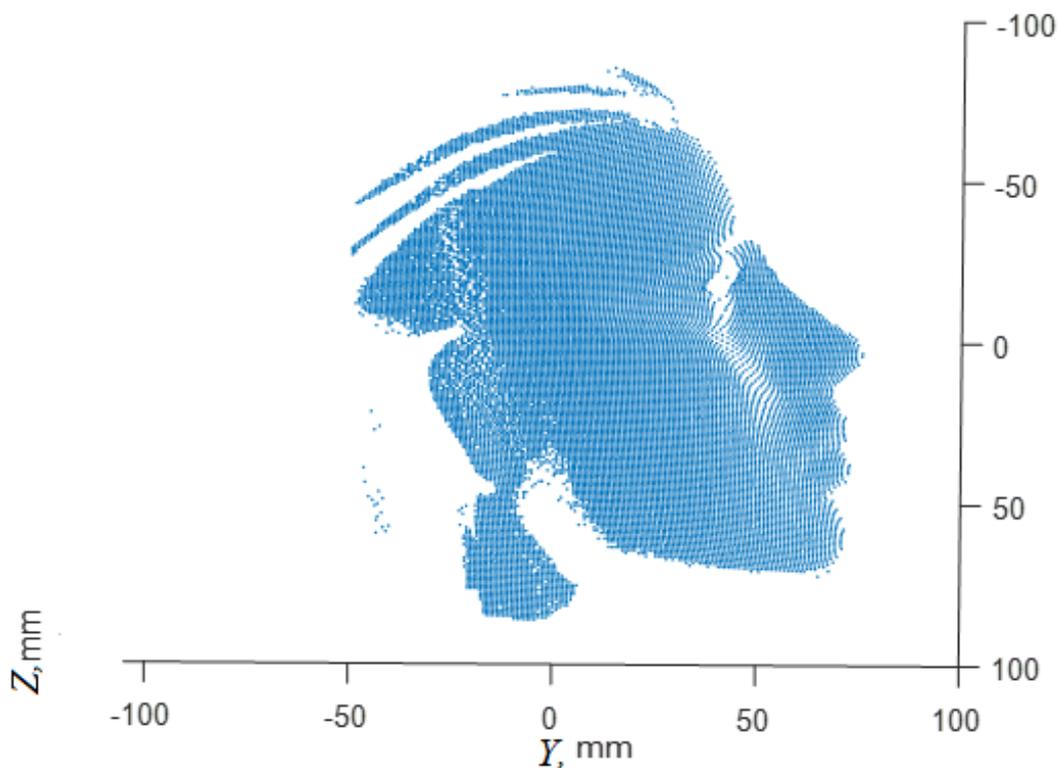


Рис. 1. Трехмерный профиль головы манекена, измеренный с использованием численного алгоритма определения фазового сдвига

Для измерения трехмерного профиля применялся метод на основе бинарных кодов Грея и метод фазовых шагов. Используются 20 изображений метода фазовых шагов для измерения фазы и 10 изображений бинарных кодов Грея, обеспе-

чивающих кодирование горизонтальной координаты пикселей на проекторе, так как  $2^{10}=1024$ . Использование метода фазовых шагов обеспечило снижение погрешности определения координат пикселя проектора за счет того, что метод фазовых шагов устойчив к расфокусировке анализируемых изображений. Период проецируемой синусоиды составлял 102,4 пиксела. Таким образом, на матрицу проектора проецировалось 10 синусоидальных полос с последовательным сдвигом начальной фазы.

Погрешность оценивалась экспериментально с помощью анализа распределения измеренного облака точек от плоской поверхности. В результате установлено, что среднеквадратичное отклонение результатов измерения плоской поверхности не превышала 15 мкм.

### *Заключение*

В работе предложен численный алгоритм быстрого поиска начального фазового сдвига на фазовых изображениях с произвольными межкадровыми сдвигами. Метод основан на итерационном поиске минимального отклонения модельной функции от результатов измерения. Применение алгоритма интервального поиска позволило существенно снизить вычислительную сложность алгоритма. Показано, что погрешность предложенного метода сравнима с погрешностью метода расшифровки фазовых изображений на основе аналитического решения системы уравнений, описывающих интенсивность на фазовых изображениях. Продемонстрирована работоспособность предложенного метода. Выполнены измерения трехмерного профиля головы манекена с характерными размерами  $200 \times 200 \times 200$  мм. Полученное облако измеренных точек поверхности подтверждают эффективность предложенного метода и высокую практическую ценность.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чугуй Ю.В. Фурье-оптика трехмерных объектов постоянной толщины на основе дифракционных моделей // Автометрия, Т. 53, № 5, 2017. – С. 90–105.
2. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия, Т.53, №2, 2017. – С. 56–62.
3. Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement, Vol.145, 2019. – P. 63–70.
4. Гужов В.И., Ильиных С.П., Поздняков Г.А., Хайдуков Д.С. Восстановление изображений из цифровых голограмм, полученных при задании случайных фазовых сдвигов // Автометрия, 2019. – Т. 55, № 6. – С. 126–135.
5. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 48(2), 149–158 (2010).

6. Chen L., Liang C., Nguyen X., Shu Y., Wu H.-W. High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction // *Meas. Sci. Technol.* 21 (10) (2010) 105309.
7. Lohry W., Zhang S. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns // *Opt. Express* 22, 26752–26762 (2014).
8. Wissmann P., Schmitt R., Forster F. Fast and accurate 3D scanning using coded phase shifting and high speed pattern projection // *Proc. IEEE Conf. on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, 2011. – Pp. 108–115.
9. Zuo, C, Chen, Q., Gu, G., Feng, S., Feng, F., Rubin, L., Guochen, S. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection // *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, V.51. – Pp. 953–960.
10. Zhang S., Yau S.-T., Generic nonsinusoidal phase error correction for threedimensional shape measurement using a digital video projector // *Appl. Opt.* 2007, V.46 (1). – Pp. 36–43.
11. Zhang S., Huang P.S., Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method // *Opt. Eng.*, 2007, V. 46 (6). – Pp. 063601-9.
12. Song L., Chang Y., Xi J., Guo Q., Zhu X., Li X. Phase unwrapping method based on multiple fringe patterns without use of equivalent wavelengths // *Opt. Commun.* 2015. – V.355. – Pp. 213–224.
13. Armangue X., Salvi J., Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // *Pattern Recognition*. – 2002. – Vol. 35 (7). – P. 1617–1635.
14. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // *Метрология №4*, 2010. – С. 15–27.
15. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения геометрии трехмерных объектов. Патент РФ № 2439489, приоритет 15.09.2010, опубликовано 10.01.2012.

© С. В. Двойнишников, Д. В. Куликов, В. Г. Меледин, В. Г. Главный, 2022