

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО–  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,  
METROLOGY,  
AND INFORMATION–  
MEASUREMENT  
SYSTEMS

УДК 535.411.854

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166

## Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига<sup>\*</sup>

В.И. ГУЖОВ<sup>а</sup>, Г.А. ПОЗДНЯКОВ<sup>б</sup>, Е.Е. СЕРЕБРЯКОВА<sup>с</sup>

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>а</sup>v.guzhov@corp.nstu.ru <sup>б</sup>worlaff@gmail.com <sup>с</sup>silver-kate94@mail.ru

В статье описывается новый способ определения разности между двумя полями фазовых значений. Метод определения разности фазовых полей может быть использован при исследовании напряженно-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии или для измерения полей смещений и деформаций при исследовании больших объектов методами фазового структурированного освещения.

В последние годы широкое распространение получили системы для измерения профиля объектов, основанные на методе пошагового фазового сдвига (PSI). При интерференционных исследованиях возникает картина полос с периодом, определяемым длиной волны и углом между интерферирующими полосами. При структурированном освещении объекта синусоидальными полосами находится поле фазовых величин с периодом, определяемым величиной периода проецированной синусоидальной картины. По серии картин с известными значениями фазового сдвига находятся поля фаз, пропорциональные профилю поверхности с наклоном, соответствующим несущей частоте.

Для определения разности двух фазовых полей необходимо сначала устранить фазовую неоднозначность для каждого из них и только после этого вычитать искомые значения. В статье предлагается по найденным фазовым значениям генерировать новые серии синусоидальных полос с выбранными значениями сдвигов, затем определять поле разности фаз методом PSI.

Предлагаемый в статье способ позволяет вместо устранения фазовой неоднозначности для каждого состояния объекта использовать удаление неоднозначности только для искомой разности фаз. Если разность фазовых полей – более простая функция, чем профиль анализируемой поверхности, то достигается значительное упрощение при анализе переходов через период.

**Ключевые слова:** интерференция, голографическая интерферометрия, структурированное освещение, пошаговый фазовый сдвиг, определение разности фаз, фазовая неоднозначность, разность фаз, поле смещений, деформация

---

<sup>\*</sup> Статья получена 19 сентября 2018 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание № 8.12007.2018/11.12).

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных способов расшифровки интерференционных изображений является метод пошагового фазового сдвига (phasesampling, phaseshiftinginterferometry – PSI) [1–6]. Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известную величину. Результат интерференции двух фронтов можно записать в виде

$$I(x, y) = I_0(x, y) (1 + V(x, y) \cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y))). \quad (1)$$

В этом выражении три неизвестных:  $I_0(x, y)$  – средняя интенсивность,  $V(x, y)$  – контраст,  $\Delta\varphi(x, y) = \varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$  – фазовая разность между интерферирующими фронтами.

Для однозначного определения всех неизвестных необходимо не менее трех взаимно независимых уравнений. Взаимная независимость достигается, например, если в каждое из этих уравнений добавить постоянный фазовый сдвиг  $\delta_i$ . В этом случае можно определить значения разности фаз  $\Delta\varphi(x, y)$  из системы уравнений

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) (1 + V(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y) + \delta_i)), \quad (2)$$

где  $i = 0, 1, \dots, m-1$ ,  $m$  – число фазовых сдвигов большее или равное трем.

Нами получена обобщенная схема определения разности фаз для различного числа сдвигов [7]:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\vec{I}^\perp \vec{C}}{\vec{I}^\perp \vec{S}}\right), \quad (3)$$

где  $\vec{I} = (I_0, \dots, I_{m-1})^T$  – набор измеренных интенсивностей с различными фазовыми сдвигами  $\delta_i$ ;  $\vec{C} = (\cos \delta_0, \dots, \cos \delta_{m-1})^T$  и  $\vec{S} = (\sin \delta_0, \dots, \sin \delta_{m-1})^T$  – набор синусов и косинусов от известных фазовых сдвигов; вектор  $\vec{C}^\perp$  – вектор, ортогональный  $\vec{C}$ ;  $\vec{S}^\perp$  – вектор, ортогональный  $\vec{S}$ . Размерность векторов определяется числом фазовых сдвигов  $m$ .

В системах определения профиля поверхности используются методы, основанные на структурированном освещении объекта [13]. Метод структурированной подсветки, который имитирует интерференционный метод, основан на освещении объекта на специально сформированном изображении синусоидальной решетки [14]. 3D-координаты поверхности определяют по величине искажения синусоидальной решетки [12, 13];

$$h = \alpha \cdot \Delta\varphi, \quad (4)$$

где  $h(x, y)$  – профиль поверхности;  $\alpha$  – системный коэффициент, зависящий от параметров оптической установки.

Метод пошагового фазового сдвига обеспечивает высокую точность измерения по всему полю объекта. Недостаток метода следующий: функция  $\arctan(\ )$  является периодической функцией (3), значения фазовых разностей определяются в пределах периода синусоидальной полосы, используемой для освещения.

Для определения деформаций необходимо определить поле смещений объекта в результате некоторой нагрузки. Для этого необходимо вычсть два профиля поверхности до и после воздействия некоторой силы.

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ДВУХ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ

Пусть есть два фазовых поля, которые образуются в результате простого наклона пластины (рис. 1). В левом столбце волновой фронт с наклоном, соответствующим двум периодам синусоидальной картины; волновой фронт с наклоном, соответствующим пяти периодам, и фазовое распределение разности этих фронтов (сверху вниз). В правом столбце показаны графики этих распределений по центральной строке.

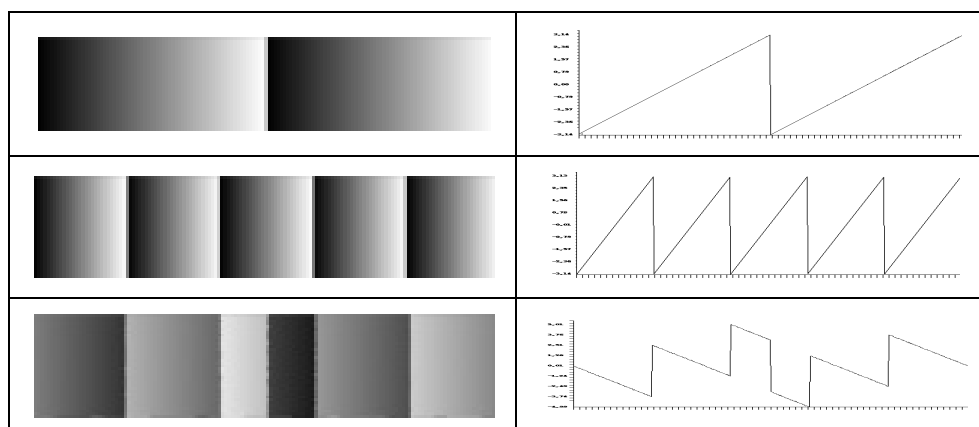


Рис. 1. Разность двух фазовых фронтов, определенных в пределах периода

Fig. 1. Subtraction of two phase fronts determined in the limit of a period

Из графика разности (нижний график в правом столбце) видно, что фазовая неоднозначность приводит к неправильному определению фазовой разности при прямом определении разности. Для правильного определения разности фаз необходимо сначала устранить фазовую неоднозначность для каждого из полей и только потом определять разность между ними (рис. 2).

На рис. 2 показано фазовое распределение до устранения фазовой неоднозначности (левый столбец) и после устранения (правый столбец).

Таким образом, для определения разности необходимо устранить фазовую неоднозначность в исходном фазовом поле и в фазовом поле после деформации объекта и только затем определять разницу между ними. В этом случае получается правильное значение разности фаз.

Устранение фазовой неоднозначности – достаточно сложная операция, она может приводить к ошибкам при восстановлении полной фазы [14, 15].

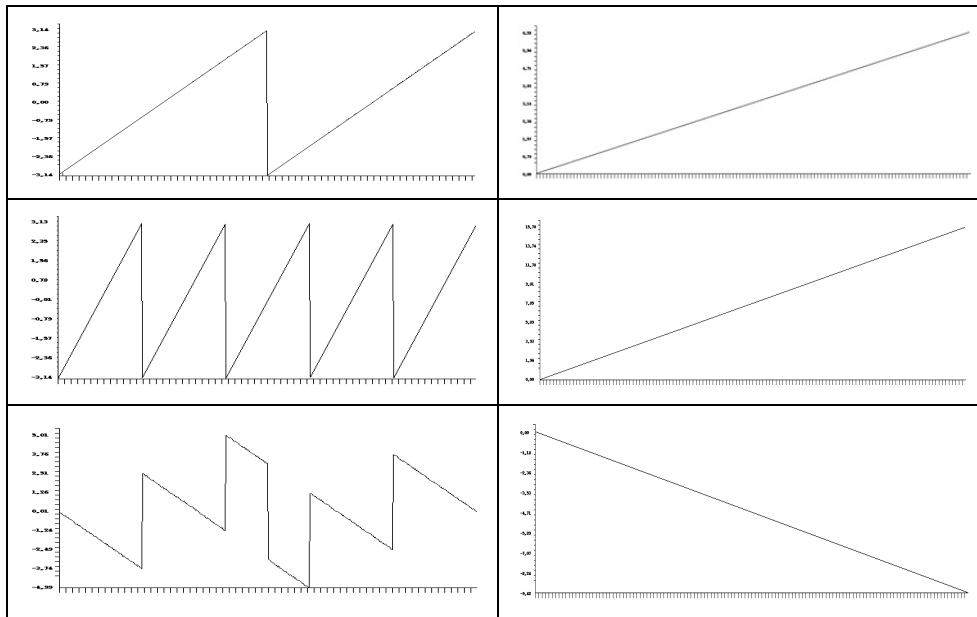


Рис. 2. Разность двух фазовых фронтов после устранения фазовой неоднозначности

Fig. 2. Subtraction of two phase fronts after eliminating phase ambiguity

Рассмотрим, как можно упростить процесс определения разности между двумя фазовыми полями.

## 2. НАХОЖДЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ БЕЗ УСТРАНЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ

Можно определить фазовое распределение  $\varphi_p(x, y)$  для первого состояния объекта и  $\varphi_r(x, y)$  – для второго состояния.

Для нахождения разности фазовых полей можно воспользоваться тем, что в результате сложения двух волновых полей можно зарегистрировать интенсивность, пропорциональную следующему выражению:

$$I_i(x, y) = \cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta_i), \quad (5)$$

где  $\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$  – разность фаз для первого и второго состояний;  $\delta_i$  – произвольно выбранный нами фазовый сдвиг.

Для четырех сдвигов  $\delta_0 = 0^\circ$ ,  $\delta_1 = 90^\circ$ ,  $\delta_2 = 180^\circ$ ,  $\delta_3 = 270^\circ$  получим серию синусоидальных картин, показанных в левом столбце на рис. 3 слева. По этим картинкам с помощью выражения (3) определяется разность фаз (рис. 3, справа).

Разность тоже имеет фазовую неоднозначность (нижний график на рисунке). Но в этом случае фазовую неоднозначность необходимо устранять только один раз для разности фаз вместо двух для каждого из фазовых фронтов, соответствующих двум состояниям объекта. В результате разность фаз определяется правильно.

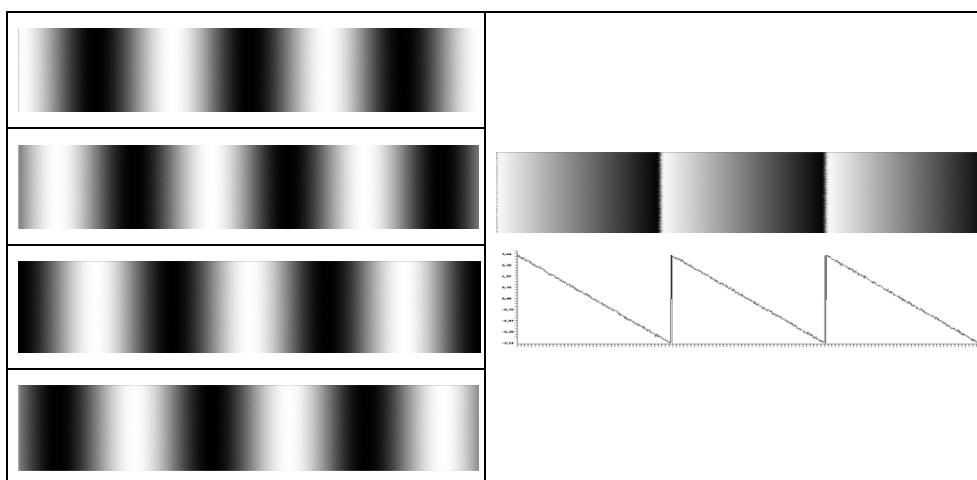


Рис. 3. Интерференционные картины (слева) и соответствующие им разности фаз (справа)

Fig. 3. A series of interference patterns corresponding to the phase difference (left column) and their corresponding phase differences (right column)

Поле разности фазовых полей в экспериментах обычно имеет достаточно простой вид, и поэтому фазовую неоднозначность устранять легче.

Измерим поле смещений балки, один конец которой закреплен, а на другой конец прилагается некоторая нагрузка. Для определения профиля объект освещается синусоидальными полосами. По набору зарегистрированных картин методом пошагового фазового сдвига определяется фазовое распределение поля, отраженного от объекта.

Пусть длина балки 50 см. Проецируем на нее картину полос с разрешением  $4000 \times 2000$  точек, число полос 20 (200 точек на полосу). В результате измерений мы получим поле фаз с периодом, определяемым размером проецируемых синусоид (рис. 4).

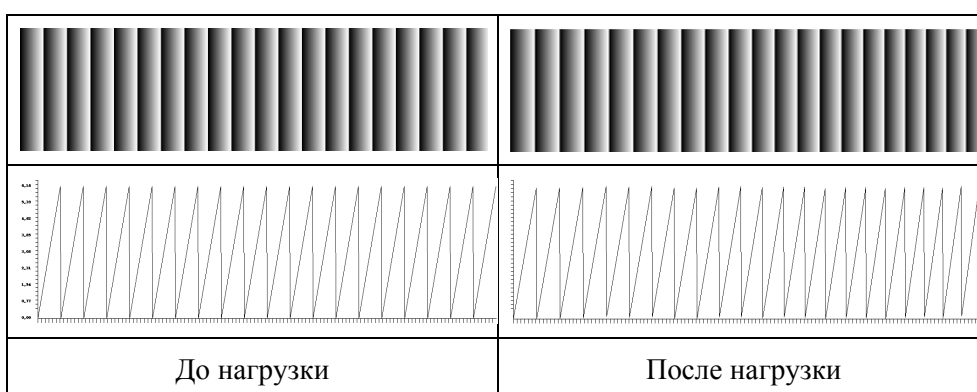


Рис. 4. Фазовое распределение от объекта при проекции на него 20 полос

Fig. 4. Phase distribution from the object by projection of 20 bands

Профиль поверхности до и после нагрузки пропорционален фазовым распределениям (4) с наклоном, соответствующим несущей частоте синусоид.

При упругих деформациях величина смещения небольшая, поэтому на рис. 4 отличия определить сложно. Однако, если воспользоваться выражением (5) для определения синусоидального поля, такие отличия становятся хорошо видны (рис. 5).

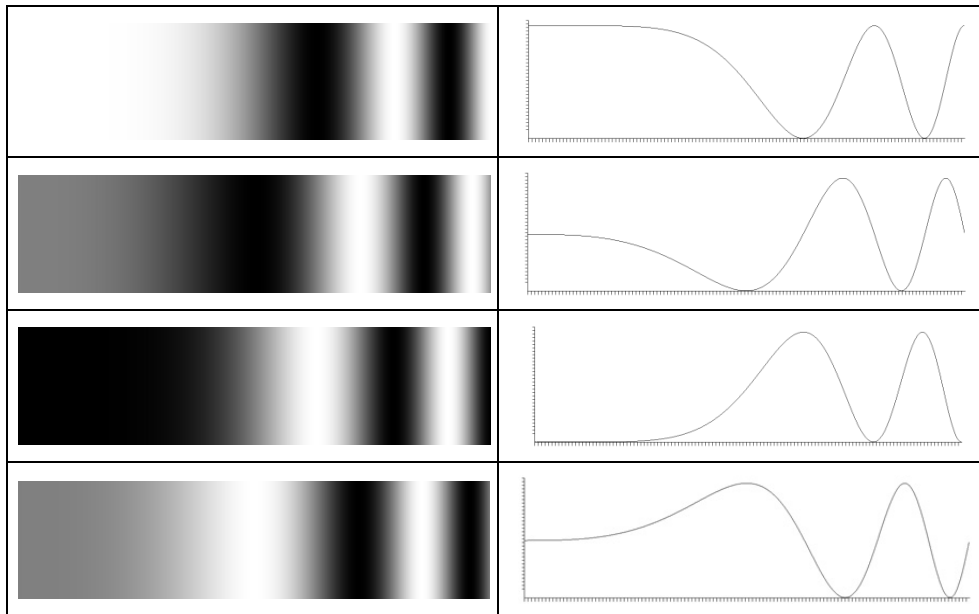


Рис. 5. Серия сгенерированных синусоидальных картин, соответствующих полю смещений объекта до и после деформаций (слева) и графики по центральной строке (справа)

Fig. 5. A series of generated sinusoidal patterns corresponding to the object displacement field before and after deformations (left column) and graphs along the central row (right column)

Интерференционные картины, показанные на рис. 5, получены со сдвигами  $\delta_0 = 0^\circ$ ,  $\delta_1 = 90^\circ$ ,  $\delta_2 = 180^\circ$ ,  $\delta_3 = 270^\circ$ . После расшифровки методом пошагового фазового сдвига получим фазовое распределение, пропорциональное полю смещений (рис. 6).

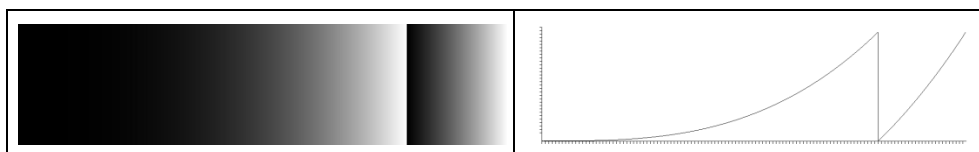


Рис. 6. Фазовое распределение, пропорциональное полю смещений, и его график по центральной строке

Fig. 6. phase distribution proportional to the displacement field, and its graph on the central line

Как видно из рис. 4, для устранения фазовой неоднозначности для фазовых распределений волнового фронта, отраженного от объекта, необходимо анализировать 20 точек перехода через  $2\pi$ , а для разности фазовых полей (рис. 6) необходимо провести анализ только в одной точке.

После устранения фазовой неоднозначности график фазового распределения совпадет с точностью до множителя с теоретическим графиком прогиба балки, показанным на рис. 7.

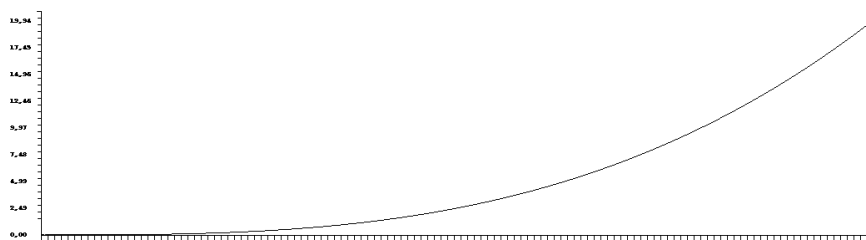


Рис. 7. График прогиба балки

Fig. 7. Graph of girder bending

Метод может применяться для исследования напряженно-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии и при измерениях полей смещений методами структурированного освещения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пошагового фазового сдвига получил в последние годы широкое распространение. Это вызвано возможностью определения разности фаз, пропорциональных профилю изучаемого объекта, по всему полю с высокой точностью. Для определения деформаций методами голографической интерферометрии и методами структурированного освещения необходимо определять поля смещений поверхности до и после воздействия на объект некоторой силы.

Традиционно для нахождения разности определяется профиль объекта до и после нагрузки. Для этого необходимо устранять фазовую неоднозначность для каждого измеренного поля фаз. Профиль объекта может быть достаточно сложным. Поэтому анализ переходов через  $2\pi$  представляет сложную проблему.

В статье описан новый способ, основанный на искусственном формировании синусоидальных полос, из которых методом пошагового фазового сдвига можно определить искомую разность фазовых полей. Поскольку распределение этой разности в большинстве практических приложений – более простая функция, чем функция, описывающая профиль поверхности, то процедура устранения фазовой неоднозначности может быть существенно упрощена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. – 1966. – Vol. 2 (1). – P. 13–23.
2. Crane R. Interference phase measurement // Applied Optics. – 1969. – Vol. 8, N 3. – P. 538–542.
3. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques // Progress in Optics. – 1988. – Vol. 26. – P. 349–393.

4. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. A digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry // Optics Communication. – 1982. – Vol. 41, N 6. – P. 393–396.
5. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems // Laser Focus. – 1982. – Vol. 18, N 5. – P. 65–67.
6. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing // Laser Focus. – 1985. – Vol. 21, N 11. – P. 118–132.
7. Ильиных С.П., Гужов В.И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Автометрия. – 2002. – № 3. – С. 123–126.
8. Caspi D., Kiryati N., Shamir J. Range imaging with adaptive color structured light // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1998. – Vol. 20, N 5. – P. 470–480.
9. Zhang L., Curless B., Seitz S.M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming // International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. – Padova, Italy, 2002. – P. 24–26.
10. Horn E., Kiryati N. Toward optimal structured light patterns // Image Vision Computing. – 1999. – Vol. 17, N 2. – P. 87–97.
11. Salvi J., Batlle J., Mouaddib E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement // Pattern Recognition Letters. – 1998. – Vol. 19 (11). – P. 1055–1065.
12. Гужов В.И., Ильиных С.П., Уберт А.Г. Проекционный метод измерения рельефа объекта // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
13. Zhang S. High-resolution, real-time 3-D shape measurement: Dr of Philosophy in Mechanical Engineering diss. – Stony Brook, NY, 2005. – 127 p.
14. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. – 1992. – № 6. – С. 24–30.
15. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, А.Р. Вагизов // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 85–91.

*Гужов Владимир Иванович*, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокоточные измерительные системы. Имеет более 200 публикаций. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

*Поздняков Григорий Александрович*, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – компьютерные голографические измерительные системы. Имеет 6 публикаций. E-mail: worlaff@gmail.com

*Серебрякова Екатерина Евгеньевна*, ассистент кафедры сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – исследование объектов методами структурированного освещения. Имеет 9 публикаций. E-mail: silver-kate94@mail.ru

*Guzhov Vladimir Ivannovich*, D.Sc. (Eng.), professor at the department of data acquisition and processing in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is high-accuracy measurement systems. He is the author of more than 200 publications. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

*Pozdnyakov Grogory Alexandrovich*, a postgraduate student in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include computer holographic measurement systems. He has published 6 research papers. E-mail: worlaff@gmail.com

*Serebryakova Ekaterina Evgenievna*, a teaching assistant at the department of data acquisition and processing in the Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is study of objects by structural illumination methods. She is the author of 9 publications. E-mail: silver-kate94@mail.ru



DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166

**Obtaining phase difference by using the step-by-step phase shift method\***V.I. GUZHOV<sup>a</sup>, G.A. POZDNYAKOV<sup>b</sup>, E.E. SEREBRYAKOVA<sup>c</sup>

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup>v.guzhov@corp.nstu.ru <sup>b</sup>worlaff@gmail.com <sup>c</sup>silver-kate94@mail.ru**Abstract**

The article describes a new method for determining the difference between two fields of phase values. The method of determining the difference of phase fields can be used to study the stress-strain state of objects using holographic interferometry methods or to measure displacement and deformation fields when studying large objects by phase-structured illumination methods.

In recent years, systems for measuring object profiles based on the method of incremental phase shift (PSI) have become widespread. In interference studies, a pattern of bands appears with a period determined by the wavelength and the angle between the interfering bands. With a structured illumination of the object with sinusoidal stripes there is a field of phase values with a period determined by the period of the projected sinusoidal pattern. Based on a series of pictures with known phase shift values, phase fields proportional to the surface profile with a slope corresponding to the carrier frequency are found.

To determine the difference between the two phase fields, it is necessary first to eliminate the phase ambiguity for each of them and then subtract the desired values. The article proposes to generate new series of sinusoidal bands with selected values of shifts from the found phase values and then to determine the phase difference field using the PSI method.

The method proposed in the article makes it possible to remove ambiguity only for the sought phase difference instead of eliminating phase ambiguities for each state of an object. If the difference in phase fields is a simpler function than the profile of the analyzed surface, then the analysis of transitions over a period is significantly simplified.

**Keywords:** interference, holographic interferometry, structured illumination, stepwise phase shift, phase difference determination, phase ambiguity, phase difference, displacement field, deformation

**REFERENCES**

1. Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*, 1966, vol. 2 (1), pp. 13–23.
2. Crane R. Interference phase measurement. *Applied Optics*, 1969, vol. 8, no. 3, pp. 538–542.
3. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques. *Progress in Optics*, 1988, vol. 26, pp. 349–393.
4. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. A digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry. *Optics Communication*, 1982, vol. 41, no. 6, pp. 393–396.
5. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems. *Laser Focus*, 1982, vol. 18, no. 5, pp. 65–67.
6. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing. *Laser Focus*, 1985, vol. 21, no. 11, pp. 118–132.
7. Ilyinykh S.P., Guzhov V.I. A generalized decoding algorithm for interferograms using phase stepping. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2002, no. 3, pp. 103–106. Translated from *Avtometriya*, 2002, no. 3, pp. 123–126.

---

\* Received 19 September 2018.

The work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State Task No. 8.12007.2018 / 11.12).

8. Caspi D., Kiryati N., Shamir J. Range imaging with adaptive color structured. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, no. 5, pp. 470–480.
9. Zhang L., Curless B., Seitz S.M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. *International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, Padova, Italy, 2002, pp. 24–26.
10. Horn E., Kiryati N. Toward optimal structured light patterns. *Image Vision Computing*, 1999, vol. 17, no. 2, pp. 87–97.
11. Salvi J., Batlle J., Mouaddib E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition Letters*, 1998, vol. 19 (11), pp. 1055–1065.
12. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Ubert A.G. Proektsionnyi metod izmereniya rel'efa ob"ekta [Projection method for measuring the topography of the object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1, pp. 23–28.
13. Zhang S. *High-resolution, real-time 3-D shape measurement*. Dr of Philosophy in Mechanical Engineering diss. Stony Brook, NY, 2005. 127 p.
14. Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. The accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 1992, no. 6, pp. 23–28. Translated from *Avtometriya*, 1992, no. 6, pp. 24–30.
15. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Kuznetsov R.A., Vagizov A.R. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, iss. 2, pp. 178–183. Translated from *Avtometriya*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 85–91.

Для цитирования:

Гужов В.И., Поздняков Г.А., Серебрякова Е.Е. Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 157–166. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166.

For citation:

Guzhov V.I., Pozdnyakov G.A., Serebryakova E.E. Poluchenie raznosti fazovykh polei pri ispol'zovanii metoda poshagovogo fazovogo sdviga [Obtaining phase difference by using the step-by-step phase shift method]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 157–166. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166.