

*С. В. Двойнишников<sup>1\*</sup>*

## **Развитие методов фазовой триангуляции для экспериментальной диагностики геометрических параметров в науке и промышленности**

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

**Аннотация.** Работа посвящена обзору практических применений и направлений развития актуальных методов фазовой триангуляции для экспериментальной диагностики геометрических параметров в науке и промышленности. Основное внимание в работе уделено анализу направлений развития методов фазовой триангуляции и перспектив их применения.

**Ключевые слова:** фазовая триангуляция, трехмерная геометрия, многоракурсные измерения

*S. V. Dvoynishnikov<sup>1\*</sup>*

## **Development of Phase Triangulation Methods for Experimental Diagnostics of Geometric Parameters in Science and Industry**

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

**Abstract.** The work is devoted to the review of practical applications and directions of development of actual methods of phase triangulation for experimental diagnostics of geometrical parameters in science and industry. The main attention in the work is paid to the analysis of the directions of development of the methods of phase triangulation and the prospects for their application.

**Keywords:** phase triangulation, three-dimensional geometry, multiview measurements

### ***Введение***

В настоящее время, методы фазовой триангуляции являются одним из наиболее широко используемых и эффективных подходов в экспериментальной диагностике геометрических параметров в науке и промышленности [1, 2].

Фазовая триангуляция – это метод оптической диагностики, который позволяет измерять деформации, перемещения и профили поверхностей объектов путем измерения фазовых изменений света, отраженного от поверхности. Этот метод основывается на соотношении фазы проецируемого на поверхность гармонического сигнала, которое зависит от расстояния между измеряемыми поверхностями.

Принцип измерения основан на триангуляционном методе с использованием структурированного освещения (рис. 1): на поверхность измеряемого объекта проецируют структурированную засветку и наблюдают с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемые искажения структурирован-

ной засветки содержат информацию о рельефе поверхности. В методе фазовой триангуляции используется структурированная засветка в виде гармонических полос, а наблюдаемые искажения анализируют по сдвигу фазы гармонической функции, которая описывает зависимость интенсивности на зарегистрированных изображениях. Такой подход имеет несколько важных преимуществ: во-первых, при обработке фазовых изображений используют алгоритмический аппарат для расшифровки интерферограмм, во-вторых, фазовые изображения обладают очень высокой устойчивостью к расфокусировке оптических элементов.

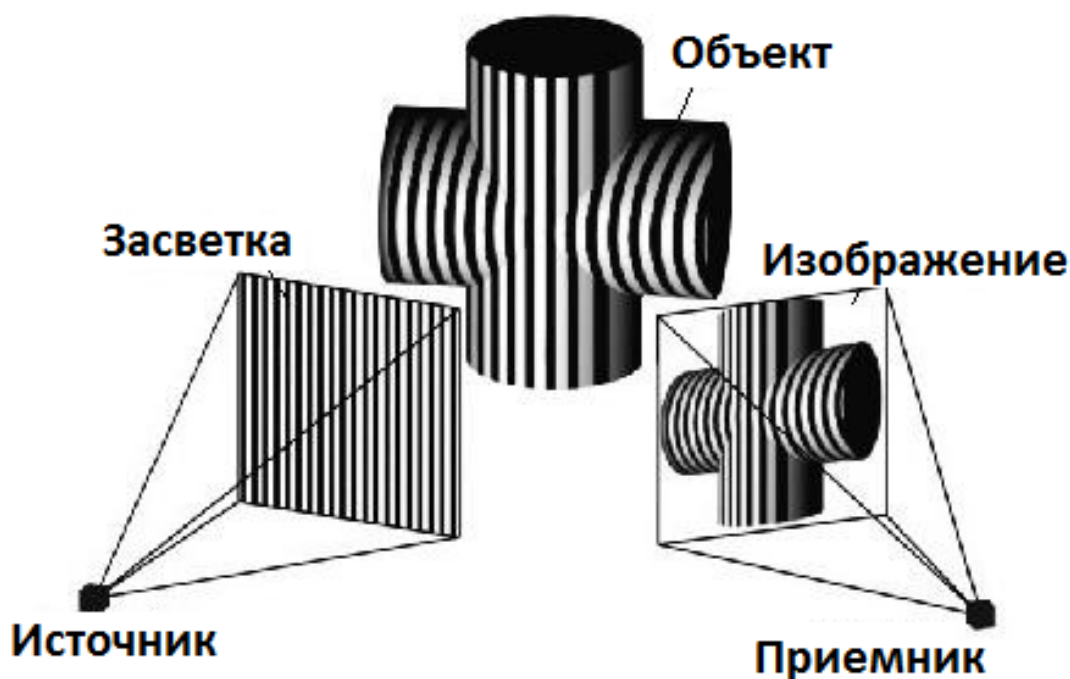


Рис.1. Принцип измерения трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции

Метод фазовой триангуляции широко используется в науке и промышленности. В научных исследованиях он применяется для изучения поверхностей объектов различной формы, таких как тела вращения, крылья самолетов, лопатки турбин и другие. Этот метод позволяет определить форму, размеры, геометрические параметры и деформации поверхностей объектов во время их работы.

### ***Практическое использование методов фазовой триангуляции***

В промышленности метод фазовой триангуляции используется для контроля технологических процессов, измерения деформаций и основных геометрических параметров объектов, обнаружения дефектов и контроля качества изделий. Методы 3D-сканирования используются в промышленных и научных приложениях, таких как контроль коррозии на основе измерения трехмерного профиля [3, 4], анализ вибрации [5, 6], измерение шероховатости поверхности [7, 8], диагностика компонентов микроэлектромеханических систем [9, 10], обратный инжиниринг [11–13], рефрактометрические приложения [14], контроль

качества изготовления печатных плат [15–17], визуализация теплового потока [18], измерение толщины листового металла [19], измерение деформации поверхности [20, 21].

Метод фазовой триангуляции с использованием структурированного освещения применяется в медицине при трехмерных стоматологических измерениях [22], измерении трехмерных характеристик формы тела человека [23, 24], трехмерном исследовании ран [9, 10], мониторинге сосудистых деформаций [25], измерении топографии кожи в косметологии [26, 27], диагностике и мониторинге сколиоза [28, 29].

Одной из особенностей метода фазовой триангуляции является высокая точность измерений и возможность работы в широком диапазоне условий и параметров. С помощью этого метода можно измерять как малые, так и большие деформации поверхностей объектов, а также контролировать их параметры в режиме реального времени.

Для обеспечения минимальной погрешности при измерении трехмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея перед началом измерительных работ подбирают и устанавливают параметры измерительных методов и функциональных оптических элементов (источника и приемника оптического излучения) [30, 31]. В случае метода фазовой триангуляции оптимизируют частоту модулирующего сигнала, увеличение которой, с одной стороны, ограничено невозможностью получить абсолютно резкое изображение, но с другой стороны целесообразно, так как погрешность измерения координаты  $z$  (глубины сцены) согласно [32, 33] обратно пропорциональна частоте пространственной модуляции излучения:

$$\Delta z = \Delta I p / (2\pi I \sqrt{N} \operatorname{tg} \theta), \quad (1)$$

где  $p$  – период пространственной модуляции;  $\theta$  – угол триангуляции;  $\Delta I/I$  – относительная погрешность фотоприемника;  $N$  – количество фазовых изображений. В случае функциональных оптических элементов (источника и приемника оптического излучения) оптимизируют: их взаимное расположение, фокусные расстояния, резкость изображения, длительность экспозиции и усиление аналогового сигнала фотоприемника [34].

Несмотря на существенное развитие и широкое применение методов фазовой триангуляции сфера их применения имеет достаточно сильные ограничения. В первую очередь они связаны с ограничениями при измерениях динамичных объектов. Поскольку метод фазовой триангуляции на основе фазовых шагов предполагает статичность измеряемого объекта, а альтернативные методы обработки фазовых изображений, как правило, либо имеют существенно более скромные метрологические характеристики, либо заточены под узкий класс измеряемых объектов, считается, что методы фазовой триангуляции работают со статичными объектами.

Тем не менее, с увеличением скорости обработки данных и с появлением высокоскоростных фотоприемников, методы фазовой триангуляции для измерения динамичных объектов стали существенно развиваться. При этом, с точки зрения метода измерения, принцип работы не изменился: в основе лежит классический метод фазовых шагов.

На сегодняшний день основные направления развития методов фазовой триангуляции нацелены на сокращение времени измерения [35–37] для обеспечения возможности измерения геометрии движущихся объектов [38, 39] и разработку быстрых и удобных методов калибровки [40–42]. При этом основное внимание исследователей направлено на решение вопроса повышения точности измерений методами фазовой триангуляции [43, 44].

С другой стороны, в последнее время появились многоракурсные методы фазовой триангуляции. Принцип измерения отличается тем, что в процессе измерения поверхность объекта наблюдается и освещается с различных ракурсов, что приводит к получению трехмерной модели, «склеенной» из набора измеренных фрагментов поверхности измеряемого объекта.

### ***Заключение***

В заключении стоит отметить, что, несмотря на широкое применение и активное развитие методов фазовой триангуляции, в настоящее время существует ряд фундаментальных ограничений, ограничивающих широкое применение методов на практике. Тем не менее, развитие методов фазовой триангуляции не стоит на месте и в ближайшем будущем можно ожидать получение новых научно-технических результатов, позволяющих еще больше расширить сферу применения методов фазовой триангуляции для высокоточных измерений геометрических параметров в науке и промышленности.

### ***Благодарности***

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РФФ 23-29-00194).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Чугуй Ю. В. Трехмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 76–91.
2. Меледин В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5. – № 1. – С. 3–12.
3. Huang P. S., Jin F., Chiang F., Opt. Laser Eng., 1999, vol. 31 (5) pp. 371–380. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(99\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(99)00019-6).
4. Jang P., et al, Proc. SPIE, 2006, 6377 (63770S) <https://doi.org/10.1117/12.694358>.
5. Yilmaz S. T., Ozugurel U. D., Bulut K., Inci M. N., Opt. Commun., 2005, vol. 249 (4–6), pp. 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.01.032>.
6. Zhang Q., Su X., Opt. Express, 2005, vol. 13 (8), pp. 3110–3116. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.003110>.
7. Spagnolo G. S., Ambrosini D., Physical, 2002, vol. 100 (2-3), pp. 180–186. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00051-1).

8. Chen L., Chang Y., *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 364-366, pp. 113–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.113>.
9. Quan C., Tay C. J., He X. Y., Kang X., Shang H. M., *Opt. Laser Techn.*, 2002, vol. 34 (7), pp. 547–552. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00070-1).
10. He X., Sun W., Zheng X., Nie M., *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 326-328, pp. 211–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.211>.
11. Burke J., Bothe T., Osten W., Hess C., *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4778, pp. 312–324. <https://doi.org/10.1117/12.473547>.
12. Lin C., He H., Guo H., Chen M., Shi X., Yu T., *Journal of Shanghai University*, 2005, vol. 9 (2), pp.153–158. <https://doi.org/10.1007/s11741-005-0069-z>.
13. Hecht J., Lamprecht K., Merklein M., Galanulis K., Steinbeck J., *Key Engineering Materials*, 2007, vol.344, pp. 847–853. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.847>.
14. De Angelis M., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Pierattini G., *Opt. Commun*, 2000, vol. 175 (4), pp. 315–321. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(00\)00477-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00477-6).
15. Yen H., Tsai D., Yang J., *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, vol. 29 (1), pp. 50–57. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2005.862632>.
16. Hui T., Pang G. K., *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42 (7-8), pp. 725–734. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1639-6>.
17. Hong D., Lee H., Kim M. Y., Cho H., Moon J., *Appl. Opt.*, vol. 48 (21), pp.4158–4169. <https://doi.org/10.1364/AO.48.004158>.
18. Ambrosini D., Paoletti D., *Opt. Eng.*, 2007, vol. 46 (9), 093606. <https://doi.org/10.1117/1.2779023>.
19. Roger Ernst R. V., Weckenmann A., *Local Wall Thickness Measurement of Formed Sheet Metal Using Fringe Projection Technique*, *Proceedings XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium*, June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia, 2003, pp. 1802–1805.
20. Zhang Q., Su X., *Opt. Laser Technol.*, 2002, vol. 34 (2), pp. 107–113. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(01\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(01)00097-4).
21. Cobelli P. J., Maurel A., Pagneux V., Petitjeans P., *Experiments in Fluids*, 2009, vol.46 (6) pp. 1037–1047. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0611-z>.
22. Chen L., Huang C., *Meas. Sci. Techn.*, 2005, vol. 16 (5), pp. 1061–1068. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/5/003>.
23. Lilley F., Lalor M. J., Burton D. R., *Opt. Eng.*, 2000, vol. 39 (1), pp. 187–195. <https://doi.org/10.1117/1.602351>.
24. Moore C. J., Burton D. R., Skydan O., Sharrock P. J., Lalor M., *Proc. Int. Confe. Medical Information Visualisation – BioMedical Visualisation*, 2006, 1691277, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/MEDIVIS.2006.3>.
25. Genovese K., Pappalettere C., *Opt. Laser Eng.*, 2006, vol. 44 (12), pp. 1311–1323. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.12.005>.
26. Jaspers S., Hopermann H., Sauermann G., Hoppe U., Lunderst<sup>•</sup> R., Ennen J., *Skin Research and Technology*, 1999, vol. 5 (3), pp. 195–207. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.1999.tb00131.x>.
27. Lagarde J. M., Rouvrais C., Black D., Diridollou S., Gall Y. *Skin Research and Technology*, 2001, vol.7 (2) , pp. 112–121. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0846.2001.70210.x>.
28. Hanafi A., Gharbi T., Cornu J., *Appl. Opt.*, 2005, vol. 44 (12), pp. 2266–2273. <https://doi.org/10.1364/AO.44.002266>.
29. Berryman F., Pynsent P., Fairbank J., Disney S., *European Spine Journal*, 2008, vol. 17 (5), pp. 663–672. <https://doi.org/10.1007/s00586-007-0581-x>.
30. Gorthi S. S., Rastogi P., *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, iss. 2, pp. 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.001>.
31. Dvoynishnikov S. V., Rakhmanov V. V., Kabardin I. K., Meledin V. G., *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.054>.

32. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. – 1992. – № 6. – С. 24–30.
33. Двойнишников С. В., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология. – 2010. – № 4. – С. 15–27.
34. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 17–21.
35. L. Song Phase unwrapping method based on multiple fringe patterns without use of equivalent wavelengths // Opt. Commun.(2015).
36. X. Peng et al. Multi-resolution reconstruction of 3-D image with modified temporal unwrapping algorithm // Opt. Commun. (2003).
37. J. Tian et al. A generalized temporal phase unwrapping algorithm for three-dimensional profilometry // Opt. Lasers Eng. (2008).
38. N. D’Apuzzo Overview of 3D surface digitization technologies in Europe.
39. M. Gruber et al. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation // Optik (1992).
40. L. Chen et al. High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction // Meas. Sci. Technol. (2010).
41. W. Lohry et al. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns // Opt. Express (2014).
42. P. Wissmann et al. Fast and accurate 3D scanning using coded phase shifting and high speed pattern projection.
43. S. Zhang et al. Generic nonsinusoidal phase error correction for threedimensional shape measurement using a digital video projector // Appl. Opt. (2007).
44. S. Zhang et al. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method // Opt. Eng. (2007).

© С. В. Двойнишников, 2023