

*В. О. Зуев<sup>1\*</sup>, С. В. Двойнишников<sup>1</sup>, Г. В. Бакакин<sup>1</sup>, В. А. Павлов<sup>1</sup>*

## **Исследование зависимости погрешности метода фазовой триангуляции от взаимного расположения оптических элементов**

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию зависимости погрешности метода фазовой триангуляции от взаимного расположения оптических элементов. Производя изменение угла триангуляции в диапазоне  $23^{\circ}$ – $65^{\circ}$  и поддерживая значения промежуточных параметров измерительного метода постоянными, оценивалась погрешность восстановления трехмерной геометрии и кодирующего сигнала. Для исключения влияния пространственного разрешения на погрешность измерений из-за ограниченного диапазона положений трансфокатора эксперимент выполнен независимо для диапазонов углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$  и  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ . На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Увеличение угла триангуляции может приводить к монотонному росту погрешности восстановления кодирующего сигнала, что может объясняться ухудшением отношения сигнал/шум. Увеличение угла триангуляции приводит к монотонному уменьшению погрешности восстановления трехмерной геометрии. Следовательно, основной вклад в погрешность восстановления трехмерной геометрии вносит угол триангуляции. Можно сделать вывод, что для повышения точности измерения систем прецизионной диагностики геометрических параметров на основе фазовой триангуляции требуется увеличение угла триангуляции.

**Ключевые слова:** фазовая триангуляция, оптические элементы, угол триангуляции

*V. O. Zuev<sup>1\*</sup>, S. V. Dvoynishnikov, G. V. Bakakin<sup>1</sup>, V. A. Pavlov<sup>1</sup>*

## **Investigation of the Dependence of the Phase Triangulation Method Error on Optical Elements Relative Position**

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

**Abstract.** The work is devoted to the study of the dependence of the phase triangulation method error on the optical elements relative position. By changing the triangulation angle in range  $23^{\circ}$ – $65^{\circ}$  and keeping the measuring method intermediate parameters constant, three-dimensional geometry and coding signal reconstruction error were estimated. To exclude the influence of spatial resolution on measurement error due to the limited range of zoom positions, the experiment was performed independently for the triangulation angle ranges  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$  and  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ . Based on the results obtained, the following conclusions can be drawn. An increase in the triangulation angle can lead to a monotonous increase in the encoding signal reconstruction error, that can be explained by a decline in the signal-to-noise ratio. An increase in the triangulation angle leads to a monotonous decrease in the three-dimensional geometry reconstructing error. Therefore, the triangulation angle makes the main contribution to the three-dimensional geometry reconstructing error. It can be concluded that in order to develop modern systems for precision diagnostics of geometric parameters based on phase triangulation, an increase in the angle of triangulation is required.

**Keywords:** phase triangulation, optical elements, triangulation angle.

### *Введение*

Несмотря на существенное развитие оптических методов диагностики геометрических параметров [1, 2], задача комплексного контроля трехмерного профиля объекта остается актуальной в науке и промышленности. В науке решение данной задачи востребовано в экспериментальных исследованиях, где контролируемый объект размещен в объеме с моделируемыми условиями [3–5]. В промышленности необходимость контроля геометрических параметров высокотехнических изделий возникает на различных производственных этапах [6, 7]: опытно-конструкторские работы, высокотехнологичное производство, эксплуатация.

Современные системы бесконтактной диагностики геометрических параметров обеспечивают возможность комплексного контроля трехмерного профиля с помощью проведения многоракурсных измерений и их представления в единой системе координат. Для сведения результатов многоракурсных измерений в единую систему координат применяются технологии [8–10] на основе поворотного стола, нанесения опорных маркерных точек на поверхность объекта, поиска отличительных геометрических характеристик. Однако применение данных измерительных методов ограничено в среде с неоднородностями показателя преломления. Это объясняется тем, что калибровка и настройка данных измерительных систем производится практически в лабораторных условиях, что приводит к росту погрешности измерений из-за отсутствия адаптации к условиям нелинейности распространения оптических сигналов.

Для решения задачи комплексного контроля трехмерного профиля объекта в условиях нелинейности распространения оптических сигналов перспективно развитие метода фазовой триангуляции. Это подтверждается возможностями адаптации метода фазовой триангуляции к условиям преломления оптических сигналов [11] и прецизионного контроля поверхности с комплексными светорассеивающими свойствами [11].

Так как в задаче комплексного контроля методом фазовой триангуляции изолированного от измерительной системы объекта накладываются ограничения на расположение оптических элементов, то требуется оптимизация их взаимного расположения для предотвращения ухудшения метрологических характеристик. В том числе требуется оптимизация угла триангуляции. С одной стороны, согласно теоретическим оценкам [12] с ростом угла триангуляции  $\theta$  уменьшается погрешность восстановления трехмерных координат:

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

где  $p$  – период пространственной модуляции;  $\Delta/I$  – относительная погрешность фотоприемника;  $N$  – количество фазовых изображений. С другой стороны, при расположении источника и приемника излучения на едином основании, увеличение угла триангуляции приводит к увеличению расстояния до объекта и между оптическими элементами, что ухудшает отношение сигнал/шум.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию зависимости погрешности метода фазовой триангуляции от взаимного расположения оптических элементов.

### *Методы исследования*

Для исследования влияния взаимного расположения оптических элементов на погрешность измерений методом фазовой триангуляции выполняется изменение угла триангуляции и последующая оценка погрешности измерений.

Для количественной оценки погрешности измерений методом фазовой триангуляции разработаны 2 метрики оценки погрешности восстановления трехмерной геометрии и промежуточных измерительных данных. Производится расчет среднего значения высокочастотной компоненты восстановленных  $Z$ -координаты и кодирующего сигнала фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея по матрице фотоприемника:

$$Z\_error = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( Z_{i,j} - \frac{\sum_{k=-4}^4 \sum_{m=-4}^4 Z_{i+k,j+m}}{9 \cdot 9} \right)}{N \cdot M}, \quad (2)$$

$$PG\_error = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( PG_{i,j} - \frac{\sum_{k=-4}^4 \sum_{m=-4}^4 PG_{i+k,j+m}}{9 \cdot 9} \right)}{N \cdot M}, \quad (3)$$

где  $N \times M$  – разрешение матрицы фотоприемника.

Зависимость погрешности измерений методом фазовой триангуляции от угла триангуляции восстанавливается путем итеративного изменения взаимного расположения оптических элементов, регистрации погрешности восстановления трехмерной геометрии и промежуточных измерительных данных. Для исключения влияния промежуточных настроек фотоприемника и фазовой триангуляции на результаты эксперимента, значения следующих параметров измерительной системы поддерживаются постоянными: экспозиция фотоприемника, усиление фотоприемника, яркость источника излучения, контраст источника излучения, количество периодов модулирующей синусоиды и фазовых сдвигов. Значения пространственного разрешения и резкости изображения, принимаемого фотоприемником, поддерживаются близкими к постоянным.

## Экспериментальная установка

Разработан экспериментальный стенд для исследования влияния взаимного расположения оптических элементов на погрешность метода фазовой триангуляции (рис. 1). В качестве источника и приемника оптического излучения используются цифровой проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и фотоприемник Imaging Source DMx 72BUC02 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP. Разрешение источника и приемника излучения установлены 1280 x 720 и 518 x 388, соответственно. В качестве измерительного объекта используется плоская поверхность размером 80 x 80 мм.

Для изменения угла триангуляции источник и приемник оптического излучения закреплены на едином основании. Обеспечена возможность изменения положения фотоприемника в диапазоне расстояний 30 – 148 см от проектора. Основание измерительной системы параллельно объекту.

Для исключения влияния резкости изображения, формируемого источником излучения, на результаты эксперимента его оптическая система доработана для формирования резкого изображения на расстоянии 55–73 см, а расположение поддержано постоянным в течение эксперимента: оптическая ось перпендикулярна объекту, расстояние до объекта 70 см, изображение в фокусе. Количество фазовых сдвигов 50.

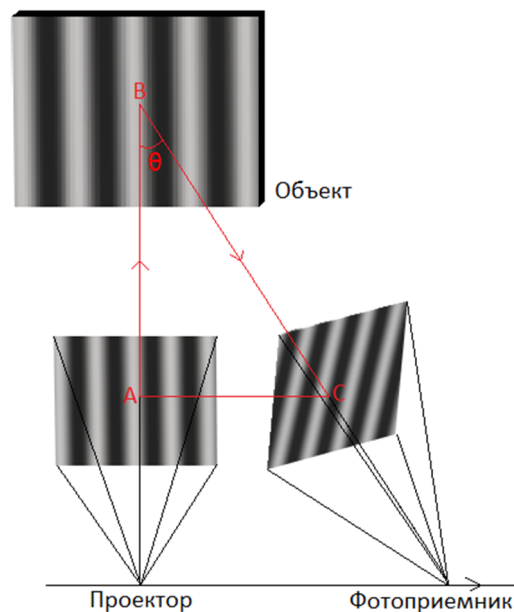


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования зависимости погрешности метода фазовой триангуляции от угла триангуляции

Для обеспечения возможности измерения трехмерной геометрии контролируемого объекта методом фазовой триангуляции выполняется калибровка с помощью двух сдвигов плоской мишени с периодичным паттерном [13] вдоль измерительного объема глубиной 10 мм, центр которого соответствует положению объекта.

## Экспериментальные результаты

Исследована зависимость погрешности измерений методом фазовой триангуляции от взаимного расположения оптических элементов с помощью изменения угла триангуляции в диапазоне  $23^{\circ}$ – $65^{\circ}$ .

Для исключения влияния пространственного разрешения на погрешность измерений, количество пикселей проектора в расчете на 1 пиксель фотоприемника поддержано близким к постоянному путем итеративного изменения положения трансфокатора фотоприемника. Из-за ограниченного диапазона положений трансфокатора эксперимент разбит на 2 части и выполнен независимо для диапазонов углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$  и  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ .

Выполнено экспериментальное исследование зависимости погрешности измерений методом фазовой триангуляции в диапазоне углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$  (рис. 2), что соответствует диапазону расстояний между проектором и фотоприемником 30 – 80 см с шагом 10 см. Выполнены независимые измерения трехмерной геометрии для различного количества периодов модулирующей синусоиды на изображении проектора: 30, 40, 50. Путем итеративного изменения положения трансфокатора фотоприемника пространственное разрешение поддержано близким к постоянному  $\sim 1,33$  пикселей проектора в расчете на 1 пиксель фотоприемника при максимальном отклонении  $\sim 7,5\%$ .

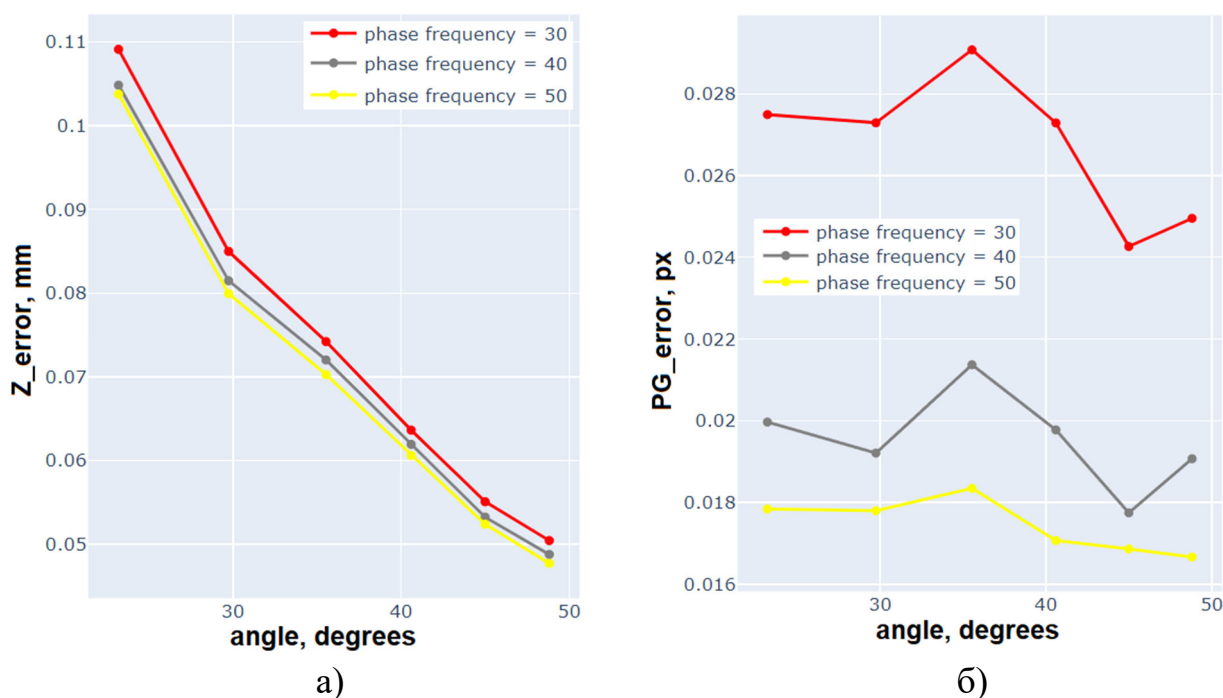


Рис. 2. Исследование влияния угла триангуляции на погрешность фазовой триангуляции в диапазоне углов  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$ : а) погрешность восстановления трехмерной геометрии; б) погрешность восстановления кодирующего сигнала на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея

Выполнен анализ результатов эксперимента в диапазоне углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$ . Минимальная погрешность измерений для исследованных углов триангуляции зарегистрирована при 50 периодах модулирующей синусоиды на изображении проектора. Зарегистрировано монотонное уменьшение погрешности восстановления трехмерной геометрии в 2,17 раз с 0,104 мм до 0,048 мм. При этом изменение погрешности восстановления кодирующего сигнала на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея составило  $< 7\%$ .

Выполнено экспериментальное исследование зависимости погрешности измерений методом фазовой триангуляции в диапазоне углов триангуляции  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$  (рис. 3), что соответствует расстояниям между источником и приемником оптического излучения: 80 см, 100 см, 120 см, 148 см. Так как в предыдущей части эксперимента для всего диапазона углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $49^{\circ}$  наименьшая погрешность измерений зарегистрирована при 50 периодах модулирующей синусоиды, то данное значение использовано для диапазона углов триангуляции  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ . Путем итеративного изменения положения трансфокатора фотоприемника пространственное разрешение поддержано близким к постоянному  $\sim 3,07$  пикселей проектора в расчете на 1 пиксель фотоприемника при максимальном отклонении  $\sim 1\%$ .

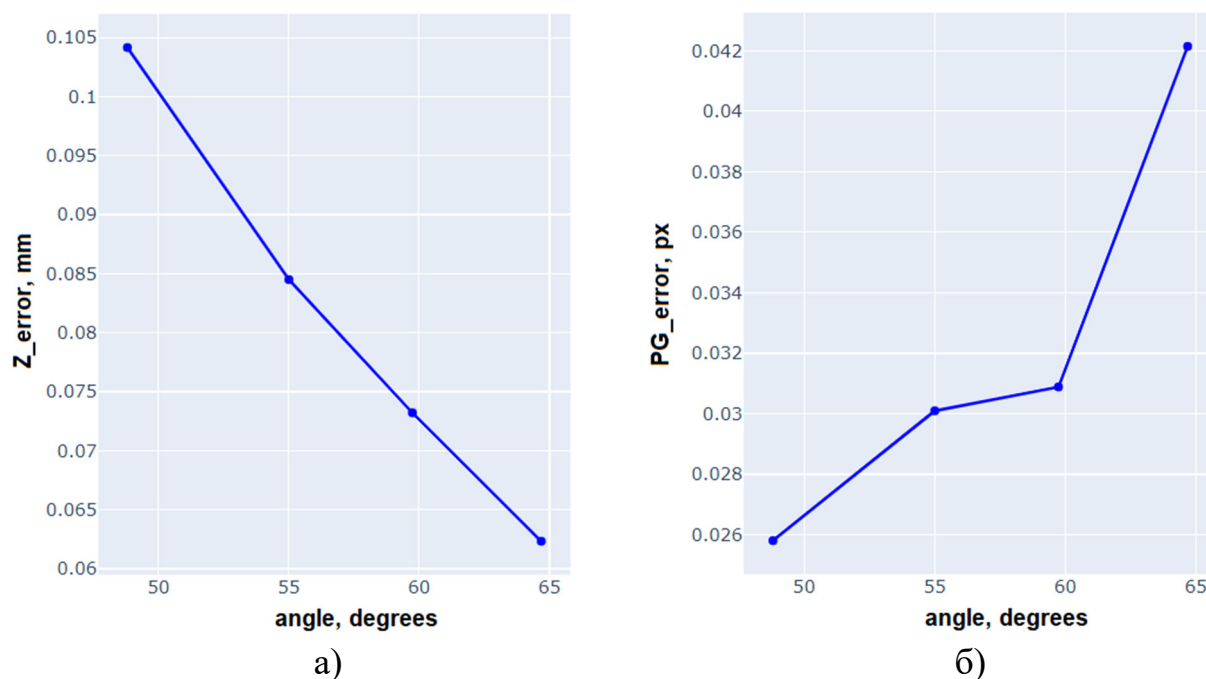


Рис. 3. Исследование влияния угла триангуляции на погрешность фазовой триангуляции в диапазоне углов  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ : а) погрешность восстановления трехмерной геометрии; б) погрешность восстановления кодирующего сигнала на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея

Выполнен анализ результатов эксперимента в диапазоне углов триангуляции  $49^{\circ}$ – $65^{\circ}$ . Зарегистрировано монотонное уменьшение погрешности восстановления трехмерной геометрии в 1,67 раз с 0,104 мм до 0,062 мм. При этом зареги-

стрировано монотонное увеличение погрешности восстановления кодирующего сигнала на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея в 1,63 раза с 0,026 пикселя до 0,042 пикселя структурированного изображения, что может объясняться ухудшением отношения сигнал/шум из-за увеличения расстояний между оптическими элементами и объектом.

### *Заключение*

В работе выполнено экспериментальное исследование зависимости погрешности метода фазовой триангуляции от взаимного расположения оптических элементов в диапазоне углов триангуляции  $23^{\circ}$ – $65^{\circ}$ . Установлено, что увеличение угла триангуляции может приводить к монотонному росту погрешности восстановления кодирующего сигнала на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Данный факт объясняется ухудшением отношения сигнал/шум из-за увеличения расстояний между оптическими элементами и объектом. При этом в течение эксперимента при увеличении угла триангуляции зарегистрировано монотонное уменьшение погрешности восстановления трехмерной геометрии объекта. Следовательно, метод фазовой триангуляции довольно устойчив к ухудшению отношения сигнал/шум, и основной вклад в погрешность восстановления трехмерной геометрии вносит угол триангуляции. Таким образом, для повышения точности измерений современных систем прецизионной диагностики геометрических параметров на основе фазовой триангуляции требуется увеличение угла триангуляции.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chugui Y. V. Three-dimensional optoelectronic measurement systems and laser technologies for scientific and industrial applications // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2015. – Т. 51. – С. 385–397.
2. Meledin V. G. Informatics of optoelectronic measurements: science and innovative industrial technologies // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2009. – Т. 18. – №. 2. – С. 99–128.
3. Gao L., Veerakumar R., Liu Y., Hu H. Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model // *Journal of visualization*. – 2019. – Т. 22. – С. 661–667.
4. Bianco G., Gallo A., Bruno F., Muzzupappa M. A comparison between active and passive techniques for underwater 3D applications // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2012. – Т. 38. – С. 357–363.
5. Saito H., Kawamura H., Nakajima M. 3D shape measurement of underwater objects using motion stereo // *Proceedings of IECON'95-21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. – IEEE, 1995. – Т. 2. – С. 1231–1235.
6. Мазур И. П. Контроль качества поверхности листового проката // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении*. – Екатеринбург, 2012. – 2013.
7. Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А. Способ изготовления и контроля качества имитаторов топливных урановых таблеток для настройки системы технического зрения контроля дефектов поверхности // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2022. — №8 (122).

8. RangeVision Quant: [Электронный ресурс]. URL: <https://quant.rangevision.com/>. (Дата обращения: 10.04.2024).
9. RangeVision PRO: [Электронный ресурс]. URL: <https://rangevision.com/products/pro/>. (Дата обращения: 10.04.2024).
10. Hexagon StereoScan neo R16.2: [Электронный ресурс]. URL: <https://hexagon.com/ru/products/stereoscan-neo>. (Дата обращения: 10.04.2024).
11. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Кабардин И.К. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – № 1. – С. 127–132.
12. Двойнишников С.В. Многопараметрическая триангуляция геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах: дисс. ... доктора техн. наук: 05.13.18. - ИАиЭ СО РАН. – Новосибирск. – 2016. – 399 с. – С. 5–58.
13. Зуев В.О. Двойнишников С.В., Павлов В.А., Куликов Д.В. Система измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции: автоматизированная калибровка параллельными сдвигами плоской мишени // Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2023». – 2023. – Т. 8. – №.1. – С. 78-85.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов, 2024