

В. О. Зуев^{1}, С. В. Двойнишников¹, В. Г. Меледин¹, В. А. Павлов¹*

Влияние параметров фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

Аннотация. Работа посвящена развитию методов оптимизации параметров фазовой триангуляции для обеспечения прецизионного контроля геометрических параметров объекта. Выполнено экспериментальное исследование влияния экспозиции, пространственного разрешения и резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции. Установлено, что изменение длительности экспозиции фотоприемника приводит к стремительному росту погрешности трехмерных измерений при регистрации интенсивности вне динамического диапазона. При регистрации интенсивности в пределах динамического диапазона фотоприемника погрешность измерений остается близкой к постоянному уровню. Показано, что дефокусировка фотоприемника приводит к росту погрешности измерений в 1,04 и 1,39 раз, согласно разным оценкам, что свидетельствует об устойчивости метода фазовой триангуляции к расфокусировке оптических элементов. Рост количества пикселей проектора в расчете на 1 пиксель матрицы фотоприемника приводит к монотонному росту погрешности измерений методом фазовой триангуляции. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволят разрабатывать быстрые и эффективные алгоритмы автоматизированного поиска оптимальных параметров метода фазовой триангуляции.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, фотоприемник, настройка параметров

V. O. Zuev^{1}, S. V. Dvoynishnikov¹, V. G. Meledin¹, V. A. Pavlov¹*

Photodetector Parameters Effect on the Measurement Error of the Phase Triangulation Method

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. The paper is devoted to the development of the phase triangulation parameters optimization methods to ensure object geometric parameters precision control. The paper presents an experimental study of the exposure, spatial resolution and photodetector image sharpness effect on the three-dimensional geometry measurement error by phase triangulation. Changing of the photodetector exposure leads to a rapid increase in the error of three-dimensional measurements when registered intensity is outside of the dynamic range, otherwise the measurement error remains close to a constant level. Significant photodetector defocus leads to the measurement error increase by 1.04 and 1.39 times according to various estimates, that indicates the stability of the phase triangulation method to the optical elements defocusing. An increase in the number of projector pixels per 1 photodetector matrix pixel leads to a monotonous increase in the phase triangulation measurement error. The results of the conducted experimental study will allow to develop fast and effective algorithms for automated optimal phase triangulation parameters search.

Keywords: phase triangulation, photodetector, parameter setting

Введение

Несмотря на стремительное развитие оптико-электронных технологий измерения трехмерной геометрии объектов [1, 2], задача обеспечения скоростного, бесконтактного, прецизионного контроля геометрических параметров остается актуальной. Существующие высокоточные измерительные системы [3, 4] требуют статичности измеряемых объектов, практически лабораторных условий эксплуатации, накладывают жесткие требования к светорассеивающим свойствам поверхности измеряемого объекта и условиям внешнего освещения.

Для решения задачи скоростного, бесконтактного, прецизионного контроля геометрических параметров перспективно развитие метода фазовой триангуляции. Это подтверждается возможностью прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов с комплексными светорассеивающими свойствами методом фазовой триангуляции [5, 6], а также возможностью одновременного контроля различных участков поверхности объекта благодаря матричному устройству источника и приемника оптического излучения.

Для обеспечения прецизионного контроля трехмерного профиля методом фазовой триангуляции требуется оптимизация параметров оптических элементов. Наибольшую сложность представляет настройка фотоприемника из-за необходимости оптимизации большого количества параметров: экспозиции, усиления, яркости, контраста, диафрагмы, резкости, трансфокатора. При этом из-за чувствительности фотоприемника и, следовательно, метода фазовой триангуляции к внешним условиям освещения требуется автоматизация поиска оптимальных параметров фотоприемника для обеспечения возможности быстрой настройки измерительной системы в различных условиях эксплуатации.

Существующие подходы автоматизированной настройки параметров фотоприемника в методе фазовой триангуляции [7] позволяют произвести оптимизацию экспозиции, усиления, яркости, контраста с помощью итеративного разбиения и сужения интервала поиска. При этом для ускорения процесса настройки и оптимизации диафрагмы, резкости, трансфокатора требуется поиск общих закономерностей влияния параметров фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции.

Данная работа посвящена исследованию влияния экспозиции, пространственного разрешения и резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции. Полученный в результате работы зависимости позволят существенно упростить процедуру настройки измерительных комплексов и даже полностью ее автоматизировать.

Методы исследования

Для исследования влияния экспозиции, пространственного разрешения и резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции значения промежуточных настроек приемника оптического

излучения поддерживаются постоянными при изменении целевого параметра и регистрации погрешности с текущими настройками системы.

Для количественной оценки погрешности измерений трехмерной геометрии контролируемого объекта методом фазовой триангуляции разработаны 2 метрики. В метрике №1 производится расчет среднего значения высокочастотной компоненты восстановленной Z -координаты по матрице фотоприемника:

$$mean_metric = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(Z_{i,j} - \frac{\sum_{k=-4}^4 \sum_{m=-4}^4 Z_{i+k,j+m}}{9.9} \right)}{N \cdot M}, \quad (1)$$

где $N \times M$ – разрешение матрицы фотоприемника. В метрике №2 производится расчет стандартного отклонения Z -координаты в восстановленном облаке трехмерных точек объекта:

$$std_metric = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (Z_{i,j} - \bar{Z})^2}{N \cdot M}}, \quad (2)$$

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

Для исследования влияния резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции используется RQ -мера резкости цифрового изображения [8]:

$$RQ = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{\left(|f_{i,j} - f_{i-1,j}| + |f_{i,j} - f_{i,j-1}| \right)^2}{(N-1) \cdot (M-1)}, \quad (3)$$

где $f_{i,j}$ – значение функции яркости изображения в пикселях с координатами (i,j) ; K – половина максимального значения яркости; M, N – ширина и высота изображения.

Экспериментальная установка

Для проведения экспериментального исследования разработана система измерения трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции, состоящая из оптических элементов, закрепленных на едином основании: фотоприемника Imaging Source DMx 72BUC02 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP и цифрового проектора TouYinGer Q10 FullHD 1080p с разрешением 1280 x 720 и доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 55–73 см. Разрешение фотоприемника программно установлено равным 518 x 388 для ускорения обработки измерительных данных. В качестве кон-

тролируемого объекта используется плоская поверхность размером 81,3 x 67,75 мм, расположенная параллельно основанию измерительной системы. Фотоприемник и проектор направлены в центр контролируемого объекта. Усиление фотоприемника установлено в минимальное значение, диафрагма объектива фотоприемника полностью открыта. Количество периодов модулирующей синусоиды и фазовых сдвигов установлено равным 50.

Калибровка измерительной системы выполняется с помощью двух параллельных сдвигов плоской калибровочной мишени [9] вдоль измерительного объема глубиной 10 мм. Контролируемый объект соответствует центру калибровочного объема.

В исследовании влияния экспозиции фотоприемника на погрешность фазовой триангуляции фотоприемник и проектор удалены от центра основания на 106 см и 43 см, при этом центр основания расположен напротив центра контролируемого объекта и удален на 54 см (рис. 1, а). Изображения проектора и фотоприемника находятся в фокусе оптической системы фотоприемника. На 1 пиксель фотоприемника приходится 0,57 мм поверхности контролируемого объекта.

В исследованиях влияния пространственного разрешения и резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции (рис. 1, б) оптическая ось проектора совпадает с нормалью к поверхности объекта, изображение проектора формируется в центральной области объекта, и оптическая система проектора сфокусирована на расстояние до поверхности объекта. Фотоприемник удален от проектора на 30 см. Расстояние между основанием и объектом составляет 70 см.

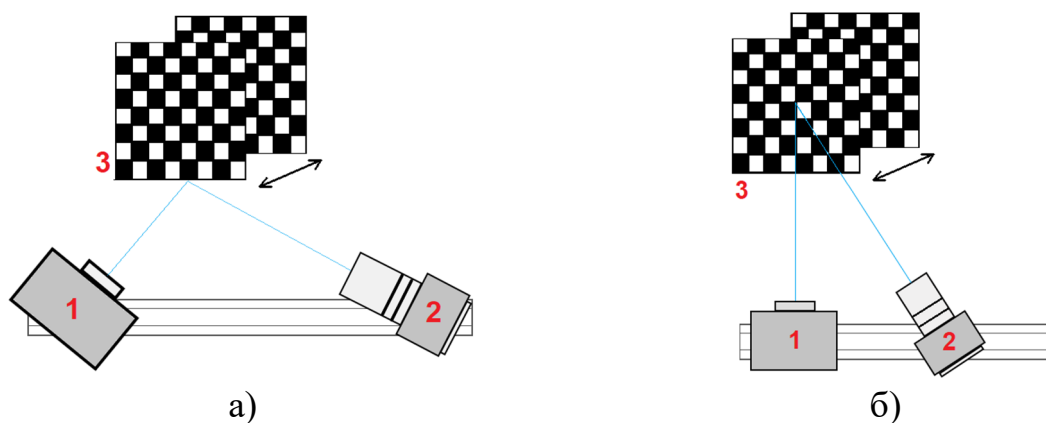


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования влияния экспозиции (а), пространственного разрешения (б) и резкости изображения фотоприемника (б) на погрешность измерений методом фазовой триангуляции: 1 – проектор, 2 – фотоприемник, 3 – измерительный объем

Для исследования влияния пространственного разрешения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции изменение линейного размера поверхности контролируемого объекта в расчете на 1 пиксель мат-

рицы приемника излучения реализуется с помощью перестройки трансфокатора объектива фотоприемника.

В исследовании влияния резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений методом фазовой триангуляции 1 пиксель фотоприемника соответствует 0,29 мм поверхности контролируемого объекта.

Экспериментальные результаты

Выполнено экспериментальное исследование влияния экспозиции фотоприемника на погрешность измерений трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции. В процессе эксперимента производилось изменение экспозиции фотоприемника в диапазоне 0,0005 – 0,0083 сек. В результате восстановлена зависимость погрешности измерений методом фазовой триангуляции от экспозиции фотоприемника (рис. 2, а).

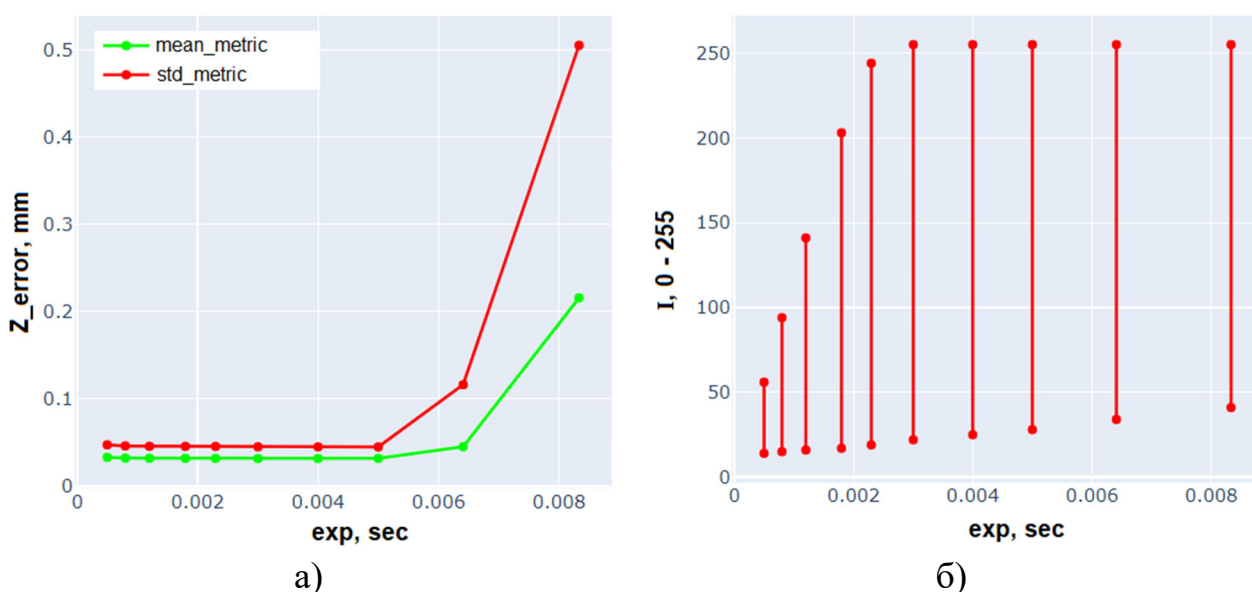


Рис. 2. Исследование влияния экспозиции фотоприемника на погрешность фазовой триангуляции: а) оценка погрешности измерений; б) диапазон зарегистрированной фотоприемником интенсивности

Выполнен анализ результатов эксперимента в соответствии с диапазоном зарегистрированной фотоприемником интенсивности (рис. 2, б). При регистрации интенсивности внутри динамического диапазона фотоприемника отклонение значений погрешности измерений методом фазовой триангуляции составило ~ 1%. Значения метрик составили: *mean_metric* ~ 0,032 мм, *std_metric* ~ 0,045 мм. При регистрации интенсивности вне динамического диапазона фотоприемника происходит быстрый, нелинейный рост погрешности измерений трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции.

Выполнено экспериментальное исследование влияния резкости изображения фотоприемника на погрешность измерений трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции. В процессе эксперимента выполнено 2 измерения трех-

мерной геометрии плоского объекта при различных настройках резкости объектива фотоприемника (рис. 3). RQ -мера резкости цифрового изображения до расфокусировки и после составила 0,6 и 0,2, соответственно.

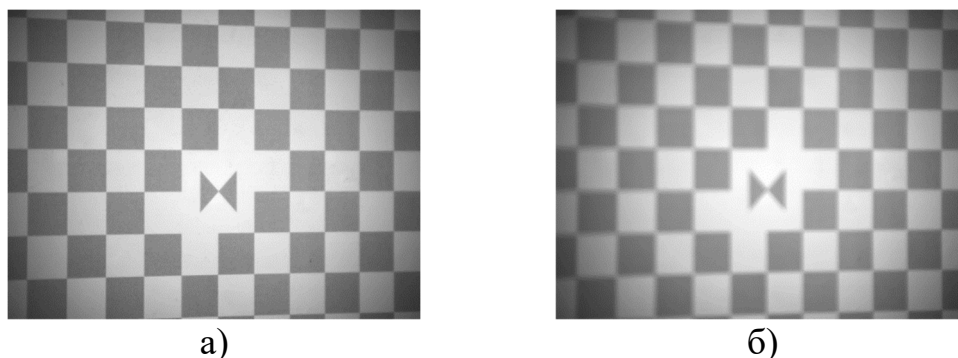


Рис. 3. Регистрируемые фотоприемником изображения при различных настройках резкости объектива

В результате расфокусировки изображения фотоприемника значение $mean_metric$ оценки погрешности трехмерных измерений методом фазовой триангуляции увеличилось в 1,04 раза с 0,085 мм до 0,087 мм, значение std_metric увеличилось в 1,39 раз с 0,105 мм до 0,146 мм.

Выполнено экспериментальное исследование влияния пространственного разрешения фотоприемника на погрешность измерений трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции. С помощью изменения положения трансфокатора объектива фотоприемника выполнено 4 измерения трехмерной геометрии плоского объекта с пространственным разрешением в диапазоне 1,03 – 2,61 пикселей проектора (0,29 – 0,75 мм) в расчете на 1 пиксель матрицы фотоприемника (рис. 4).

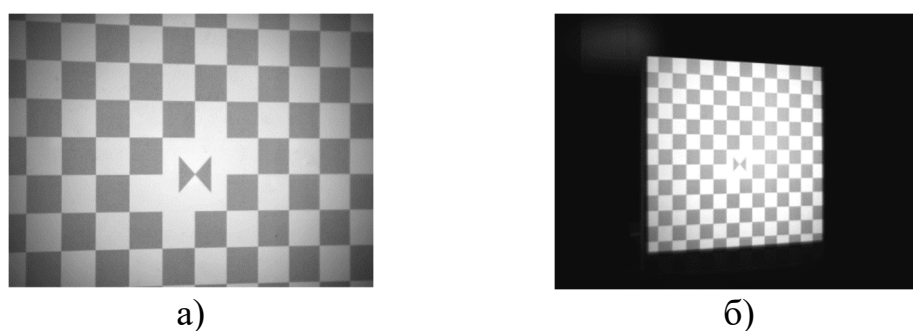


Рис. 4. Регистрируемые изображения при различных настройках трансфокатора объектива фотоприемника

В результате восстановлена зависимость погрешности измерения трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции от пространственного разре-

ния фотоприемника (рис. 5). Восстановленная зависимость является монотонной и близкой к линейной.

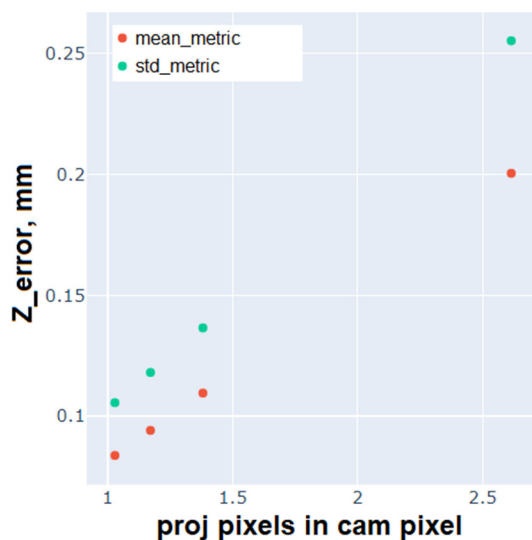


Рис. 6. Зависимость погрешности измерений методом фазовой триангуляции от количества пикселей проектора на 1 пиксель фотоприемника

Заключение

В работе выполнено экспериментальное исследование зависимости погрешности измерения трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции от параметров фотоприемника. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Для минимизации погрешности трехмерных измерений методом фазовой триангуляции значение экспозиции фотоприемника должно соответствовать условию регистрации интенсивности внутри динамического диапазона. Для обеспечения минимальной погрешности измерений методом фазовой триангуляции требуется минимизация количества пикселей проектора на 1 пиксель фотоприемника. Так как существенная дефокусировка фотоприемника не вызвала кратного роста погрешности измерений, то можно сделать вывод, что метод фазовой триангуляции устойчив к расфокусировке оптических элементов измерительной системы. Результаты данной работы вносят существенный вклад в развитие прецизионных методов диагностики геометрических параметров на основе фазовой 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. Cavedo F., Norgia M., Pesatori A., Solari G.E. Steel Pipe Measurement System Based on Laser Rangefinder // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2016. – 65(6). – С. 1472–1477.
4. Li X.-Q., Wang Z., Fu L.-H. A laser-based measuring system for online quality control of car engine block // Sensors (Switzerland). – 2016. – 16(11). – С. 1877.
5. Gao L. et al. 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.
6. 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.
7. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Главный В.Г., Рахманов В.В. Автоматизированный поиск оптимальных параметров оптических элементов системы измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции // Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2023». – 2023. – Т. 8. – №. 1. – С. 211–217.
8. Монич Ю. И., Старовойтов В. В. Мера оценки резкости цифрового изображения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2011. – №. 1 (55). – С. 80–84.
9. 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, В. Г. Меледин, В. А. Павлов, 2024