

В. О. Зуев¹✉, С. В. Двойнишников¹, В. Г. Меледин¹, В. А. Павлов¹

Метод фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке метода прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне на основе фазовой триангуляции. Предложен метод снижения погрешности расшифровки фазового распределения с учетом нелинейности и немонотонности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. Предложенный метод основан на восстановлении и поиске рабочего участка приемно-передаточной функции, построении обратного преобразования и его применения для зарегистрированных яркостей при работе метода фазовых шагов. Выполнено экспериментальное исследование эффективности разработанного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта. Среднеквадратичное отклонение восстановленного фазового распределения от истинного без учета нелинейности приемно-передаточной функции составило $\sim 0,87$ рад, а с ее адаптивной корректировкой $\sim 0,02$ рад. Можно сделать вывод, что применение предложенного метода контроля трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции позволит на порядок снизить погрешность трехмерных измерений.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, корректировка приемно-передаточной функции

V. O. Zuev¹✉, S. V. Dvoynishnikov¹, V. G. Meledin¹, V. A. Pavlov¹

Phase triangulation method with receiving-transmitting function adaptive correction

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the development of a phase triangulation method for three-dimensional geometry precision control of objects with light scattering properties in a wide range. A method, taking into account nonlinearity and non-monotonicity of the receiving-transmitting function in conditions of optical source and receiver limited dynamic range, is proposed. The proposed method is based on the reconstruction and search of the receiving-transmitting function work area, the construction of the inverse transformation and its application to the recorded brightness during the phase steps method operation. An experimental study of the effectiveness of the developed phase distribution decoding method with adaptive correction of the receiving-transmitting function has been performed. The standard deviation of the reconstructed phase distribution from the true one without taking into account the nonlinearity of the receiving-transmitting function was ~ 0.87 rad, and with its adaptive correction ~ 0.02 rad. It can be concluded that the proposed three-dimensional geometry control method based on phase triangulation will reduce three-dimensional measurements error by an order of magnitude.

Keywords: phase triangulation, receiving-transmitting function correction

Введение

Актуальность разработки и развития оптико-электронных систем измерения трехмерной геометрии обусловлена необходимостью высокоточного контроля геометрических параметров сложнопрофильных объектов в задачах науки и промышленности. Для достижения требуемого уровня погрешности контроля трехмерной геометрии, обеспечения надежной работы оптико-электронной измерительной системы и расширения диапазона контролируемых объектов требуется учет влияния на промежуточные измерительные данные внешнего нестационарного освещения и светорассеивающих свойств контролируемой поверхности.

Современные оптико-электронные системы измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции обеспечивают бесконтактный, неразрушающий контроль геометрических параметров с погрешностью на уровне 10^{-5} м [1], устойчивость к расфокусировке формирующей и регистрирующей оптических подсистем [2], параллельный контроль десятков тысяч точек поверхности [3] и возможность проведения скоростных измерений с помощью оптимизации количества и внутреннего устройства структурированных изображений [4].

Для прецизионного контроля трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции требуется минимизация погрешности расшифровки начальной фазы модулирующей синусоиды φ на основе набора значений яркости I^{in} , зарегистрированных фотоприемником в ходе линейных сдвигов $\Delta\varphi_i$ фазовой функции и итеративного формирования структурированных изображений с распределением яркости:

$$I_i^{out} = a_0 + a_1 \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_i). \quad (1)$$

Зачастую, при восстановлении фазового распределения предполагается линейность приемно-передаточной функции измерительного тракта и пропорциональность I^{in} и I^{out} , что сводит задачу поиска φ к решению системы трансцендентных уравнений [5]. Однако, отсутствие учета нелинейности приемной функции фотоприемника и передаточной функции источника приводит к возникновению систематической погрешности трехмерных измерений. Применение известных подходов расшифровки фазового распределения на основе восстановления обратной приемно-передаточной функции измерительного тракта [6] или предположение о ее соответствии степенному закону [7] требует строгой монотонности зависимости регистрируемой интенсивности от формируемой, что, зачастую, не реализуется из-за влияния светорассеивающих свойств контролируемой поверхности и ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. В результате проблема расшифровки фазовых изображений с адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности коррективкой приемно-передаточной функции измерительного тракта, компенсацией ее нелинейности и немонотонности остается актуальной.

Данная работа посвящена разработке метода измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции.

Метод адаптивной корректировки приемно-передаточной функции

Для минимизации погрешности восстановления фазового распределения в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения разработан метод адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности корректировки приемно-передаточной функции измерительного тракта. Основная идея предложенного метода заключается в восстановлении приемно-передаточной функции K и поиске рабочего диапазона $[I_S^{in}, I_E^{in}]$, где K является строго монотонной, и обеспечивается возможность расчета формируемой яркости структурированной засветки I^{out} на основе зарегистрированной I^{in} .

Для восстановления приемно-передаточной функции измерительного тракта в заданном элементе матрицы фотоприемника формируют I^{out} и регистрируют I^{in} серию из N изображений с линейным увеличением яркости до 255 (рис. 1):

$$I_i^{out} = \frac{255 \cdot (i+1)}{N}. \quad (2)$$

В восстановленной зависимости I^{in} от I^{out} реализуется поиск индексов S^* , E^* начала и конца наиболее длинного строго монотонного участка (рис. 2, а):

$$S^*, E^* = \operatorname{argmax}_{i,j} (j-i | I_k^{in} < I_{k+1}^{in} \forall k \in \{i \dots j-1\}). \quad (3)$$

Для минимизации погрешности восстановления I^{out} на основе I^{in} в условиях внешних аддитивных шумов реализуется пороговая фильтрация найденного строго монотонного участка по значению первой производной (рис. 2, б):

$$S = \operatorname{argmin}_{i, i \geq S^*} \left(i \left| \frac{I_{i+1}^{in} - I_i^{in}}{I_{i+1}^{out} - I_i^{out}} \right| > thresh \right), \quad (4)$$

$$E = \operatorname{argmax}_{i, i \leq E^*} \left(i \left| \frac{I_i^{in} - I_{i-1}^{in}}{I_i^{out} - I_{i-1}^{out}} \right| > thresh \right). \quad (5)$$

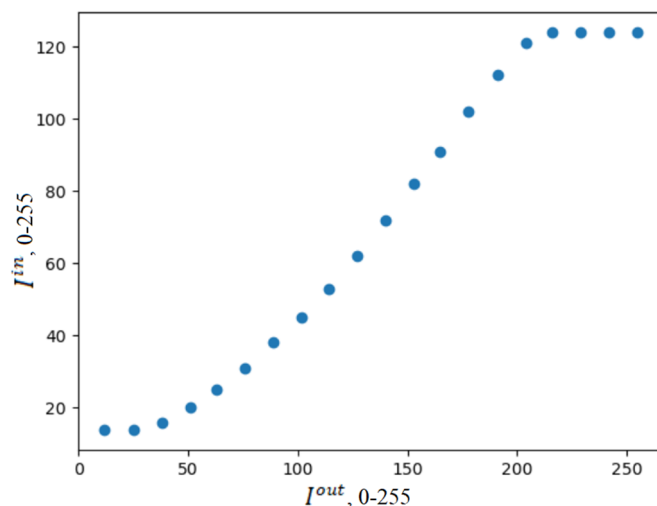


Рис. 1. Восстановление приемно-передаточной функции на основе 20 точек

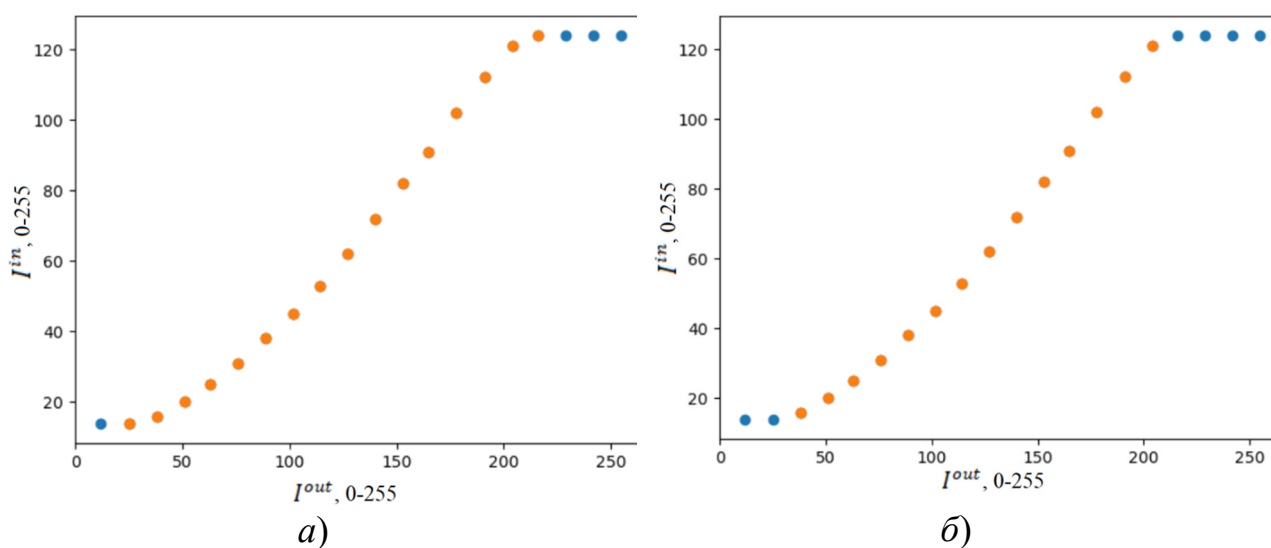


Рис. 2. Поиск рабочего диапазона приемно-передаточной функции на основе фильтров по строгой монотонности (а) и первой производной (б)

Расчет порогового значения $thresh$ реализуется на основе среднего значения первой производной приемно-передаточной функции в диапазоне $[I_{in}^{S*}, I_{in}^{E*}]$:

$$thresh = \frac{I_{E*}^{in} - I_{S*}^{in}}{2 \cdot (I_{E*}^{out} - I_{S*}^{out})}. \quad (6)$$

В результате работы разработанного метода адаптивной корректировки приемно-передаточной функции K восстанавливаются ее рабочий участок $[I_S^{in}, I_E^{in}]$ и взаимно-однозначное соответствие между яркостями на формируе-

мом и регистрируемом изображениях. В ходе работы метода фазовых шагов при регистрации яркости I^{in} в диапазоне $[I_S^{in}, I_E^{in}]$ однозначно восстанавливается значение яркости на формируемом структурированном изображении $K^{-1}(I^{in})$.

Восстановление фазового распределения при неравномерных сдвигах фазы

Применение метода фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции K для измерения трехмерной геометрии контролируемого объекта требует восстановления фазового распределения в условиях неравномерных фазовых сдвигов. При регистрации яркости I^{in} вне рабочего диапазона $[I_S^{in}, I_E^{in}]$ отсутствует возможность восстановления значения яркости на формируемом структурированном изображении I^{out} с помощью K^{-1} . В результате в ходе работы метода фазовых шагов при регистрации яркости I_i^{in} в диапазоне $[I_S^{in}, I_E^{in}]$ в итоговое распределение I^{reg} сохраняют значение формируемой яркости $K^{-1}(I_i^{in})$ и соответствующее значение фазового сдвига $\Delta\varphi_i$.

Для восстановления фазового распределения φ на основе наборов восстановленных значений яркости I_i^{reg} и соответствующих им фазовых сдвигов $\Delta\varphi_i$ учитывается гармонический характер распределения I^{reg} :

$$\sin(\varphi + \Delta\varphi_i) = k \cdot I_i^{reg} + b. \quad (7)$$

Поиск целевого значения φ реализуется путем равномерного разбиения интервала поиска, детектирования участка с наименьшим значением метрики, сужения интервала поиска и циклического повторения вышеописанной последовательности (рис. 3).

На каждой итерации поиска φ производится расчет коэффициентов k и b :

$$k = \frac{\sum_{i=0}^{M-2} \frac{\sin(\varphi + \Delta\varphi_{i+1}) - \sin(\varphi + \Delta\varphi_i)}{I_{i+1}^{reg} - I_i^{reg}}}{M-1}, \quad (8)$$

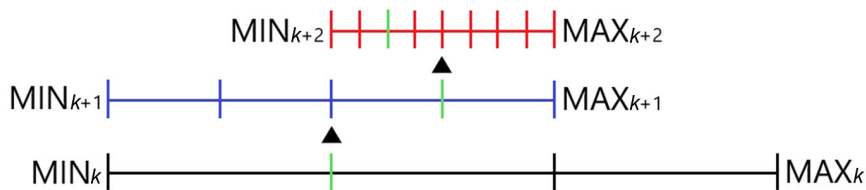


Рис. 3. Демонстрация работы метода итеративного сужения интервала поиска φ

$$b = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sin(\varphi + \Delta\varphi_i) - k \cdot I_i^{reg}}{M}, \quad (9)$$

где M – размер выборки I^{reg} .

В качестве метрики оптимальности расшифровки φ используется стандартное отклонение STD набора I^{diff} :

$$I_i^{diff} = \sin(\varphi + \Delta\varphi_i) - k \cdot I_i^{reg} - b, \quad (10)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \left(I_i^{diff} - \frac{\sum_{j=0}^{M-1} I_j^{diff}}{M} \right)^2}{M}}. \quad (11)$$

Наилучшему результату расшифровки φ соответствует минимум используемой метрики.

В результате путем настройки количества итераций сужения интервала поиска φ обеспечена возможность расшифровки фазового распределения с заданной погрешностью в условиях неравномерных сдвигов фазы.

Экспериментальные результаты

Выполнено экспериментальное исследование эффективности разработанного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта и компенсацией ее нелинейности и немонотонности.

Измерительная система включала цифровой проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и фотоприемник Imaging Source DMx 72BUC02 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP. В элементах матрицы фотоприемника восстановлены зависимости регистрируемой I^{in} от проецируемой I^{out} яркости (рис. 1). Сгенерированы 50 формируемых источником излучений изображений фазовых сдвигов с частотой 50 и разрешением 1280×720. Путем изменения их разрешения до 518×388 и применения ранее восстановленных в элементах матрицы фотоприемника приемно-передаточных функций получен набор зарегистрированных фотоприемником изображений. С разрешением 518×388 также сохранено исходное фазовое распределение. На основе зарегистрированных фотоприемником изображений восстановлено фазовое распределение с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта и без нее. В установлен-

ном горизонтальном пиксельном срезе размером 325 элементов (рис. 4, а) выполнен анализ отклонения восстановленного значения фазы от истинного (рис. 4, б).

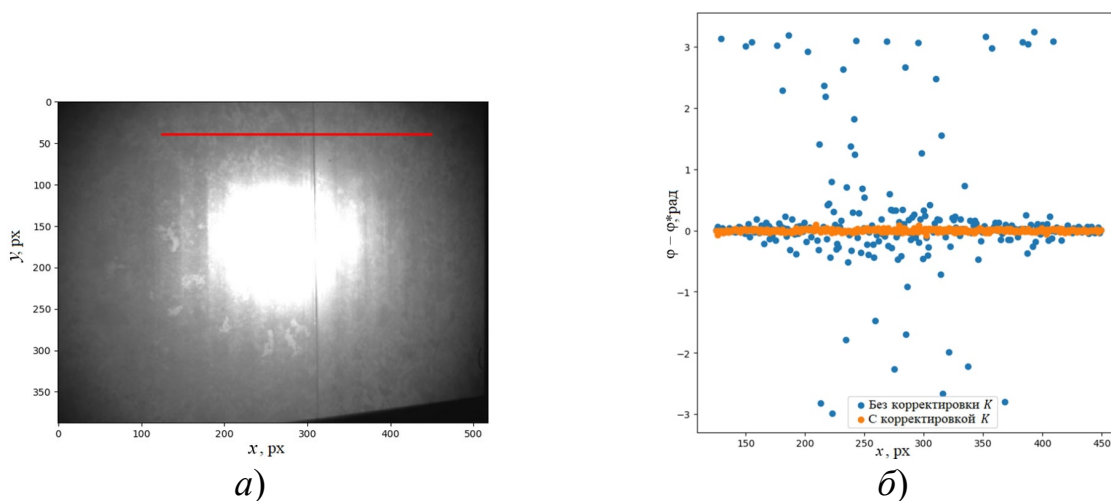


Рис. 4. Отклонение восстановленного фазового распределения от истинного б) в заданном пиксельном срезе матрицы фотоприемника а)

В результате среднеквадратичное отклонение восстановленного фазового распределения от истинного без учета нелинейности приемно-передаточной функции составило $\sim 0,87$ рад, а с ее адаптивной корректировкой $\sim 0,02$ рад.

Заключение

В работе предложен метод измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции с адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности корректировкой приемно-передаточной функции. Применение разработанного метода адаптивной корректировки приемно-передаточной функции измерительного тракта обеспечивает учет ее нелинейности и строгой немонотонности в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции и демонстрируют возможность на порядок снизить погрешность измерений методом фазовой триангуляции. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Система измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 46–51.
2. 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.
3. Omid P., Najiminaini M., Diop M., Carson J.J. Single-shot 4-step phase-shifting multispectral fringe projection profilometry // Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 18. – С. 27975–27988.
4. Zuo C., Tao T., Feng S., Huang L., Asundi A., Chen Q. Micro Fourier transform profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Т. 102. – С. 70–91.
5. Chen Y., Kema Q. Phase-shifting algorithms with known and unknown phase shifts: comparison and hybrid // Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 5. – С. 8275–8302.
6. Zuo C., Feng S., Huang L., Tao T., Yin W., Chen Q. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review // Optics and lasers in engineering. – 2018. – Т. 109. – С. 23–59.
7. Wang J., Wu Z., Huang Y., Yue H., Liu Y. A rapid and accurate gamma compensation method based on double response curve fitting for high-quality fringe pattern generation // Optics & Laser Technology. – 2023. – Т. 160. – С. 109084.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. А. Павлов, 2025