

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 535.411.854

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-137-146

Устранение нелинейности изображений^{*}

В.К. ШПЕРЛИНГ^а, С.П. ИЛЬНЫХ^б

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

^а Vladimir-shperling@yandex.ru ^б isp51@yandex.ru

В статье рассматривается метод автоматического устранения нелинейности при регистрации интенсивности в проекционных оптико-измерительных системах. Ошибки в регистрации интенсивности существенно влияют на точность фазовых измерительных систем, основанных на структурированном освещении объектов. Аппаратные средства гамма-коррекции не могут полностью устранить такие искажения, поскольку обратная зависимость может быть более сложной функцией. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является нахождение множества корректирующих функций по полю изображения. Метод основан на покадровой проекции идеального клина и автоматическом определении необходимых параметров для регистрации изображения.

Предложенный подход учитывает пространственную неоднородность искажений, что позволяет достичь более высокой точности коррекции по сравнению с традиционными методами. Экспериментальные результаты показывают значительное снижение среднеквадратической ошибки восстановления синусоидального сигнала, особенно в периферийных областях изображения. Метод может быть применен в различных проекционных системах, включая 3D-сканеры, системы дополненной реальности и измерительные комплексы для анализа деформаций поверхностей. В работе также приводится анализ существующих методов коррекции нелинейности и их недостатков.

Предложенный метод коррекции нелинейности интенсивности изображения основан на использовании шахматной структуры, которая позволяет одновременно определять геометрические искажения проекционной системы и разбивать изображение на области для определения локальных функций нелинейности. Для каждой ячейки шахматной доски проецируется последовательность изображений с различными уровнями интенсивности. Это позволяет построить кривую нелинейности для каждой ячейки фото и найти соответствующие корректирующие функции. Эксперименты показывают, что предложенный метод значительно улучшает форму синусоидального сигнала, особенно в периферийных областях изображения. Это подтверждается расчетом среднеквадратической ошибки между идеальным и зарегистрированным синусоидальным сигналом. Предложенный метод демонстрирует очень высокую точность коррекции нелинейности изображений при средней вычислительной сложности, что делает его предпочтительным для использования в различных проекционных оптико-измерительных системах.

^{*} Статья получена 16 июня 2025 г.

Ключевые слова: нелинейность регистрации интенсивности, проекционные системы, фазовые измерения, структурированное освещение, гамма-коррекция, пространственная неоднородность, калибровка проектора, трехмерная реконструкция, обработка изображений, интерполяция функций

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: устранение нелинейности интенсивности изображения с учетом изменения корректирующей функции по полю изображения.

Научная новизна: разработан метод устранения нелинейности интенсивности изображения с учетом изменения корректирующей функции по полю изображения.

Системы со структурированным освещением широко применяются для построения трехмерных моделей объектов и исследования их напряженно-деформированного состояния [1]. Точность таких систем во многом зависит от правильной передачи интенсивности спроецированного изображения. Основной проблемой является нелинейность тракта передачи интенсивности, которая искажает фазовые соотношения в структурированном свете [2, 3].

В работах [4, 5] показана возможность коррекции нелинейности интенсивности с использованием обратной функции преобразования для всего изображения в целом. Однако такой подход предполагает, что характер искажений одинаков для всех точек изображения, что на практике не всегда соответствует действительности [6, 7].

В этой статье мы предлагаем метод, учитывающий пространственную неоднородность функции нелинейности по полю изображения, что позволяет существенно повысить точность измерений при использовании проекционных систем.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Нелинейность тракта передачи изображения может быть описана функцией

$$I_{reg} = f(I_{proj}, x, y), \quad (1)$$

где I_{reg} – регистрируемая интенсивность, I_{proj} – проецируемая интенсивность, x, y – координаты точки в плоскости изображения.

Для компенсации нелинейности необходимо найти обратную функцию

$$I' = f^{-1}(I_s, x, y), \quad (2)$$

где I' – скорректированная интенсивность, которую следует подать на проектор; I_s – желаемая интенсивность, которую мы хотим получить после регистрации.

В отличие от классического подхода, предполагающего, что вид передаточной функции не зависит от координат изображения, мы рассматриваем случай, когда функция имеет различный вид в разных областях изображения.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования пространственной неоднородности функции нелинейности используется проекция структурированного изображения шахматного типа (рис. 1).

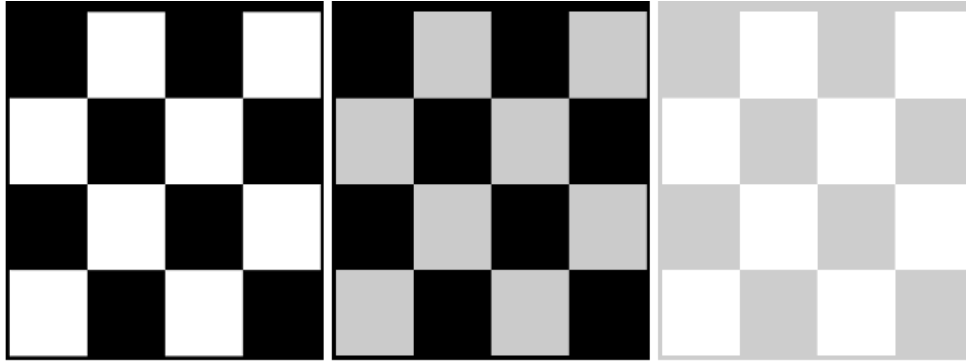


Рис. 1. Изображение шахматной доски с различной интенсивностью окрашивания

Fig. 1. Image of the chessboard with a different intensity of squares

Шахматная структура выбрана по двум причинам:

- 1) она позволяет одновременно определять геометрические искажения проекционной системы [8];
- 2) обеспечивает удобное разбиение изображения на области для определения локальных функций нелинейности.

Для каждой ячейки шахматной доски проецируется последовательность изображений с различной интенсивностью (от 0 до 255 с шагом 16). Для каждого уровня интенсивности регистрируется соответствующее изображение, что позволяет построить кривую нелинейности для каждой ячейки.

Процедура калибровки состоит из следующих этапов:

- 1) проекция и регистрация серии изображений шахматной структуры с различными уровнями интенсивности;
- 2) автоматическое обнаружение узловых точек шахматной доски с использованием алгоритма Харриса;
- 3) построение функции нелинейности для каждой ячейки шахматной доски;
- 4) построение обратной функции коррекции для каждой ячейки;
- 5) интерполяция функций коррекции для промежуточных точек изображения.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ В УЗЛОВЫХ ТОЧКАХ

Для каждой ячейки шахматной доски строится зависимость регистрируемой интенсивности от проецируемой аналогично методу, описанному в [9]. Мы используем 16 градаций яркости и аппроксимируем полученную зависимость для получения обратной функции.

Процедура определения обратной функции для каждой ячейки аналогична описанной в методике построения обратного клина. Для каждой града-

ции i из 16 находится такое проецируемое значение I'_i , которое дает на выходе желаемое значение I_{s_i} :

$$I' = f^{-1}(I_s, x, y), \quad (3)$$

$$f(I'_i, x_k, y_k) = I_{s_i}, \quad (4)$$

где (x_k, y_k) – координаты центра k -й ячейки шахматной доски.

На рис. 2 показаны графики функции нелинейности, вычисленной по данной методике для разных областей изображения.

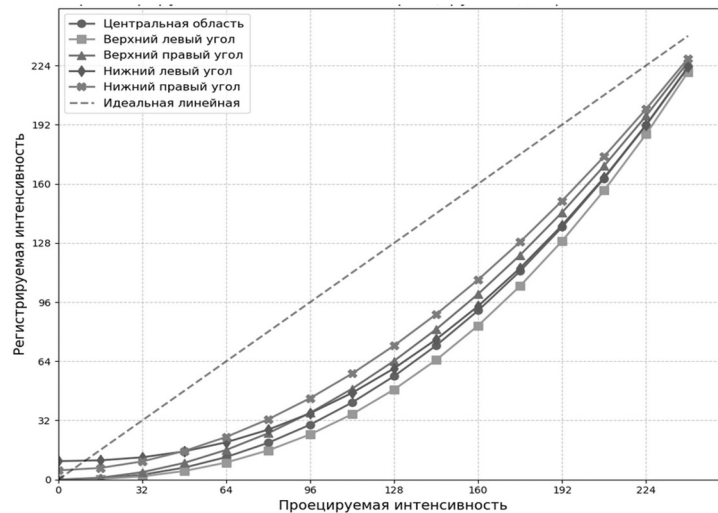


Рис. 2. График зависимости регистрируемой интенсивности от проецируемой для разных областей изображения

Fig. 2. Graph of the dependence of the recorded intensity on the projected intensity for different areas of the image

Как видно из графика на рис. 2, функции нелинейности существенно различаются для разных областей изображения. В центральной области нелинейность менее выражена, чем на периферии. Это подтверждает необходимость учета пространственной неоднородности при коррекции нелинейности. Наибольшие различия наблюдаются в области средних интенсивностей, что особенно критично для точного восстановления фазы в системах структурированного освещения [10].

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗБИЕНИЯ НА ОБЛАСТИ

Поскольку определение функции коррекции для каждой точки изображения является вычислительно сложной задачей, мы предлагаем компромиссное решение, основанное на определении функций коррекции только для узловых точек с последующей аппроксимацией для промежуточных областей.

Для определения оптимального количества узловых точек мы проводим исследование зависимости точности коррекции от количества точек. Экспери-

ментально установлено, что для типичной проекционной системы достаточно использовать сетку 5×5 узловых точек, что обеспечивает ошибку коррекции интенсивности не более 2 %.

Для аппроксимации функции коррекции во всех промежуточных точках изображения используется метод наименьших квадратов (МНК), который позволяет точно моделировать пространственное распределение функции нелинейности.

Для каждого уровня интенсивности I_s функция коррекции аппроксимируется полиномом второй степени от координат изображения:

$$I'(I_s, x, y) = a_0(I_s) + a_1(I_s)x + a_2(I_s)y + a_3(I_s)x^2 + a_4(I_s)xy + a_5(I_s)y^2, \quad (5)$$

где коэффициенты $a_0, \dots, a_5$ определяются методом наименьших квадратов по значениям функции коррекции в узловых точках для каждого уровня интенсивности I_s :

$$\sum_k \left[I(I_s, x_k, y_k) - I'(I_s, x_k, y_k) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где суммирование ведется по всем узловым точкам (x_k, y_k) .

Для определения коэффициентов полинома составляется и решается система нормальных уравнений.

Использование полиномиальной аппроксимации методом МНК обеспечивает сглаживание функции коррекции, что уменьшает влияние локальных ошибок измерения в узловых точках и способствует получению более устойчивого результата коррекции. [11]

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для демонстрации эффективности предложенного метода был проведен эксперимент с проекцией синусоидального паттерна, широко используемого в системах структурированного освещения для фазовых измерений. Эксперимент позволяет наглядно продемонстрировать влияние нелинейности на точность восстановления фазы и эффективность различных подходов к коррекции.

В эксперименте использовался синусоидальный паттерн вида

$$I(x_k, y_k) = A + B \sin(2\pi f_x x + \varphi), \quad (7)$$

где A – средняя интенсивность, B – амплитуда, f – пространственная частота, φ – начальная фаза.

Проекция паттерна осуществлялась в трех режимах:

- 1) без коррекции нелинейности;
- 2) с коррекцией нелинейности по одной центральной точке изображения [12–14];
- 3) с применением предложенного метода коррекции с учетом пространственной неоднородности.

На рис. 3 представлены результаты проекции синусоидального паттерна без коррекции нелинейности. Анализ профиля интенсивности по горизонтальной линии показывает значительное искажение синусоидальной формы сигнала. Нелинейность приводит к асимметрии положительной и отрицательной

полуволн, появлению гармонических искажений и, как следствие, к существенным ошибкам при восстановлении фазы.

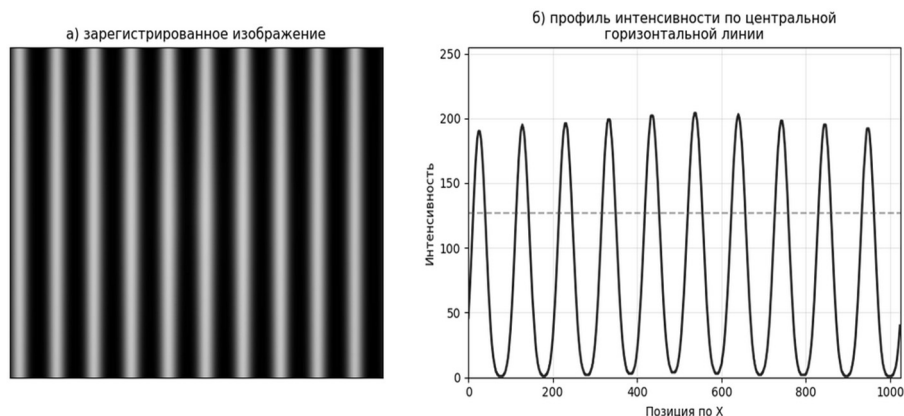


Рис. 3. Проекция синусоидального паттерна без коррекции нелинейности

Fig. 3. Projection of a sinusoidal pattern without nonlinearity correction

При применении коррекции нелинейности по одной центральной точке изображения (рис. 4) наблюдается существенное улучшение формы сигнала в центральной области. Однако на периферии изображения всё еще присутствуют заметные искажения, что подтверждает наличие пространственной неоднородности функции нелинейности.

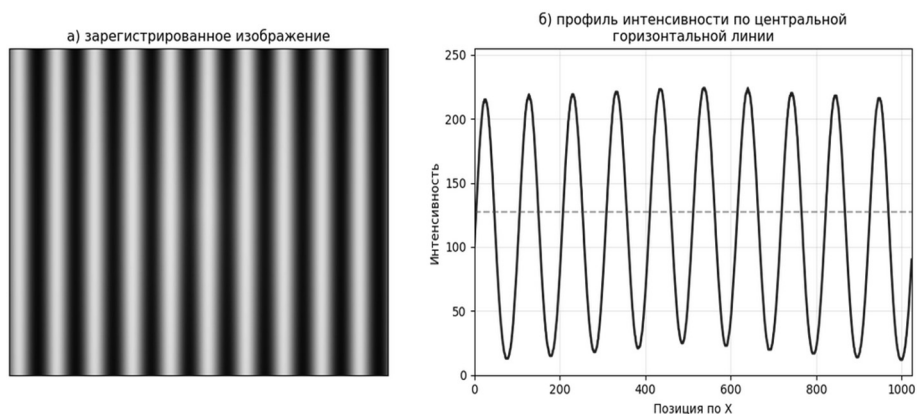


Рис. 4. Проекция синусоидального паттерна с коррекцией нелинейности по центральной точке

Fig. 4. Projection of a sinusoidal pattern with nonlinearity correction along the central point

Результаты применения предложенного метода с учетом пространственной неоднородности функции нелинейности представлены на рис. 5. Анализ профилей интенсивности показывает, что форма синусоидального сигнала восстановлена с высокой точностью по всему полю изображения. Гармонические искажения минимизированы как в центральной, так и в периферийных областях изображения.

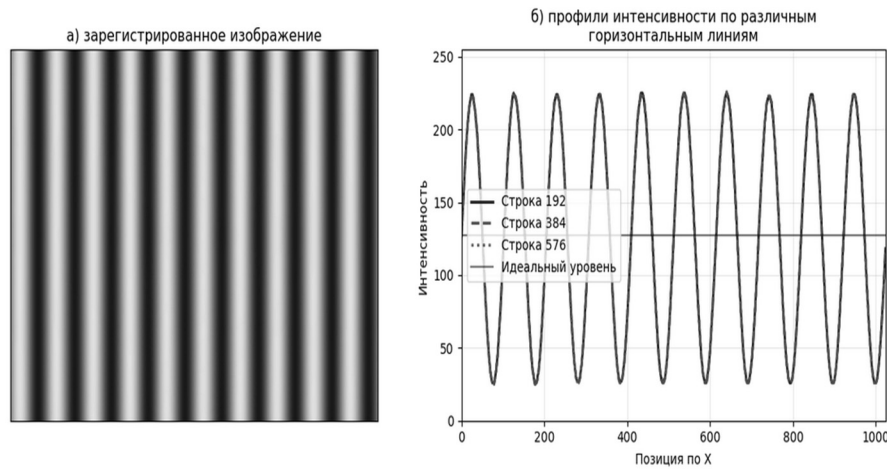


Рис. 5. Проекция синусоидального паттерна с применением предложенного метода коррекции

Fig. 5. Projection of a sinusoidal pattern using the proposed correction method

Для количественной оценки эффективности предложенного метода была рассчитана среднеквадратическая ошибка (СКО) между идеальным и зарегистрированным синусоидальным сигналом для всех трех режимов коррекции. Результаты представлены в таблице.

Среднеквадратическая ошибка восстановления синусоидального сигнала

RMS error of the sinusoidal signal reconstruction

Метод коррекции	СКО в центре изображения	СКО на периферии изображения	СКО в среднем по всему изображению
Без коррекции	21,3 %	22,9 %	22,5 %
Коррекция по центральной точке	1,3 %	3,1 %	2,7 %
Предложенный метод	0,4 %	0,7 %	0,6 %

Как видно из таблицы, предложенный метод обеспечивает значительное снижение ошибки восстановления синусоидального сигнала, особенно в периферийных областях изображения. Это подтверждает эффективность учета пространственной неоднородности функции нелинейности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод коррекции нелинейности интенсивности изображения с учетом пространственного распределения искажений в изображении. Предложенный подход дает возможность объединить операции коррекции геометрических искажений и нелинейности интенсивности, не требуя дополнительных тестовых изображений, что значительно сокращает сложность и время измерений [15, 16]. В сравнении с измерительными оптическими проекционными системами, использующими метод коррекции по центральной точке, предлагаемый метод позволяет повысить их точность не менее чем в три раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черткова Я.В., Катасонов Д.Н., Баталова К.В.* Обзор средств трехмерной реконструкции // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 6. – С. 293–298. – DOI: 10.33764/2618-981X-2021-6-293-298.
2. *Гужов В.И., Ильных С.П.* Компьютерная интерферометрия: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2025. – 258 с.
3. *Lv S., Ketao Q.* Modeling the measurement precision of fringe projection profilometry // Light: Science & Applications. – 2023. – Vol. 12 (1). – P. 257–274. – DOI: 10.1038/s41377-023-01294-0.
4. Gamma correction for three-dimensional object measurement by phase measuring profilometry / X. Ye, H.-B. Cheng, H.-Y. Wu, D.-M. Zhou, H.-Y. Tam // Optik. – 2015. – Vol. 126 (24). – p. 5534–5538. – DOI: 10.1016/j.jleo.2015.09.028.
5. *Kamagata A., Wang X., Li S.* Towards gamma-effect elimination in phase measurement profilometry // Optik. – 2018. – Vol. 172. – P. 1089–1099. – DOI: 10.1016/j.jleo.2018.07.059.
6. *Babaei A., Saadatseresht M., Kofman J.* Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma nonlinearity in 3D optical metrology // Optics Express. – 2017. – Vol. 25 (21). – P. 24927–24938. – DOI: 10.1364/OE.25.024927.
7. *Ильных С.П.* Методы и алгоритмы высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2021. – 44 с.
8. Compensation method for projector calibration based on homography and bundle adjustments / J. Lin, X. Zhang, Y. Wang, L. Wu, K. Jiang // OSA Continuum. – 2020. – Vol. 3 (11). – P. 3157–3175. – DOI: 10.1364/OSAC.403718.
9. Fast and accurate single-shot nonlinear gamma correction based on weighted fitting of multi-region responses / Z. Zhu, X. Min, Z. Chen, S. Peng // Optics Express. – 2025. – Vol. 33. – P. 40690–40702. – DOI: 10.1364/OE.574971.
10. *Xing S., Guo H.* Correction of projector nonlinearity in multi-frequency phase-shifting fringe projection profilometry // Optics Express. – 2018. – Vol. 26 (13). – P. 16277–16291. – DOI: 10.1364/OE.26.016277.
11. Calibration method for a large-scale structured light measurement system / P. Wang, J. Wang, J. Xu, Y. Guan, G. Zhang, K. Chen // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56 (14). – P. 3995–4002. – DOI: 10.1364/AO.56.003995.
12. *Lü F., Xing S., Guo H.* Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56 (25). – P. 7204–7216. – DOI: 10.1364/AO.56.007204.
13. Active projection nonlinear γ correction method for fringe projection profilometry / L. Wang, Y. Zhang, L. Yi, X. Hao, M. Wang, X. Wang // Journal of the Optical Society of America A. – 2022. – Vol. 39 (11). – P. 1983–1991. – DOI: 10.1364/JOSAA.470088.
14. Calibration method for structured light projectors based on Hilbert transform and local homography / P. Zhang, H. Xie, T. Xu, B. Kong // Smart Innovation, Systems and Technologies. – Springer, 2025. – Vol. 116. – P. 19–31. – DOI: 10.1007/978-981-96-5408-6_2.
15. Two-digit phase-coding strategy for fringe projection profilometry / X. Chen, J. Wu, R. Fan, Q. Liu, Y. Xiao, Y. Wang, Y. Wang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – P. 1–9. – DOI: 10.1109/TIM.2020.3032185.
16. *Iwai D.* Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions // Proceedings of the Japan Academy, Series B. – 2024. – Vol. 100 (3). – P. 234–251. – DOI: 10.2183/pjab.100.012.

Ильных Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Автор более 180 научных работ, в том числе учебника НГТУ и четырех патентов. Область научных интересов – разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах. E-mail: isp51@yandex.ru

Шперлинг Владимир Константинович, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах. E-mail: Vladimir-shperling@yandex.ru

Ilinykh Sergey P., professor at the Department of Computer Science, Novosibirsk State Technical University, D.Sc. (Eng.). He is the author of more than 180 scientific works, including NSTU textbook and 4 patents. His research interests cover developing algorithms for image analysis in optical measurement systems. E-mail: isp51@yandex.ru

Shperling Vladimir K., post-graduate student in Novosibirsk State Technical University. He specializes in the field. His research interests cover developing algorithms for image analysis in optical measurement systems. E-mail: Vladimir-shperling@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-137-146

Elimination of image nonlinearity*

V.K. SHPERLING^a, S.P. ILINYKH^b

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

^a Vladimir-shperling@yandex.ru ^b isp51@yandex.ru

Abstract

The article discusses a method for the automatic elimination of nonlinearity in intensity recording in projection optical measuring systems. Errors in intensity recording significantly affect the accuracy of phase measurement systems based on structured illumination of objects. Gamma correction hardware cannot completely eliminate such distortions because the inverse relationship can be a more complex function. A distinctive feature of the proposed algorithm is the finding of multiple correction functions across the image field. The method is based on frame-by-frame projection of an ideal wedge and automatic determination of the necessary parameters for image registration. The proposed approach takes into account the spatial heterogeneity of the distortion, which makes it possible to achieve higher correction accuracy compared to traditional methods. Experimental results show a significant reduction in the RMS error of the sinusoidal signal reconstruction, especially in the peripheral areas of the image. The method can be applied in various projection systems, including 3D scanners, augmented reality systems, and measuring complexes for analyzing surface deformations. The paper also provides an analysis of the existing methods for correcting nonlinearity and their disadvantages, which emphasizes the scientific novelty of the proposed algorithm. The proposed method for correcting the nonlinearity of the image intensity is based on the use of a staggered structure, which makes it possible to simultaneously determine the geometric distortions of the projection system and divide the image into regions to determine local nonlinearity functions. A sequence of images with different intensity levels is projected for each cell of the chessboard. This allows you to plot a nonlinearity curve for each cell and find the appropriate correction functions. Experiments show that the proposed method significantly improves the shape of the sinusoidal signal, especially in the peripheral areas of the image. This is confirmed by calculating the root-mean-square error (RMS) between the ideal and registered sinusoidal signal. The proposed method demonstrates a very high correction accuracy with an average computational complexity, which makes it preferable for use in various projection systems.

Keywords: nonlinearity of intensity recording, projection systems, phase measurements, structured lighting, gamma correction, spatial heterogeneity, projector calibration, three-dimensional reconstruction, image processing, function interpolation

REFERENCES

1. Chertkova Ya.V., Katasonov D.N., Batalova K.V. Obzor sredstv trekhmernoi rekonstruktsii [Overview of three-dimensional reconstruction tools]. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo GEO-Siberia*, 2021, vol. 6, pp. 293–298. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-6-293-298.
2. Guzhov V.I., Ilinykh S.P. *Komp'yuternaya interferometriya* [Computer interferometry]. Moscow, Yurait Publ., 2025. 258 p.

* Received 16 June 2025.

3. Lv S., Kemao Q. Modeling the measurement precision of fringe projection profilometry. *Light: Science & Applications*, 2023, vol. 12 (1), pp. 257–274. DOI: 10.1038/s41377-023-01294-0.
4. Ye X., Cheng H.-B., Wu H.-Y., Zhou D.-M., Tam H.-Y. Gamma correction for three-dimensional object measurement by phase measuring profilometry. *Optics*, 2015, vol. 126 (24), pp. 5534–5538. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.09.028.
5. Kamagara A., Wang X., Li S. Towards gamma-effect elimination in phase measurement profilometry. *Optics*, 2018, vol. 172, pp. 1089–1099. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.07.059.
6. Babaei A., Saadatseresht M., Kofman J. Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma nonlinearity in 3D optical metrology. *Optics Express*, 2017, vol. 25 (21), pp. 24927–24938. DOI: 10.1364/OE.25.024927.
7. Ilinykh S.P. *Metody i algoritmy vysokorazreshayushchikh optiko-elektronnykh sistem s poshagovym fazovym sdvigom*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods and algorithms of high-resolution optoelectronic systems with stepwise phase shifting. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2021. 44 p.
8. Lin J., Zhang X., Wang Y., Wu L., Jiang K. Compensation method for projector calibration based on homography and bundle adjustments. *OSA Continuum*, 2020, vol. 3 (11), pp. 3157–3175. DOI: 10.1364/OSAC.403718.
9. Zhu Z., Min X., Chen Z., Peng S. Fast and accurate single-shot nonlinear gamma correction based on weighted fitting of multi-region responses. *Optics Express*, 2025, vol. 33, pp. 40690–40702. DOI: 10.1364/OE.574971.
10. Xing S., Guo H. Correction of projector nonlinearity in multi-frequency phase-shifting fringe projection profilometry. *Optics Express*, 2018, vol. 26 (13), pp. 16277–16291. DOI: 10.1364/OE.26.016277.
11. Wang P., Wang J., Xu J., Guan Y., Zhang G., Chen K. Calibration method for a large-scale structured light measurement system. *Applied Optics*, 2017, vol. 56 (14), pp. 3995–4002. DOI: 10.1364/AO.56.003995.
12. Lü F., Xing S., Guo H. Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry. *Applied Optics*, 2017, vol. 56 (25), pp. 7204–7216. DOI: 10.1364/AO.56.007204.
13. Wang L., Zhang Y., Yi L., Hao X., Wang M., Wang X. Active projection nonlinear γ correction method for fringe projection profilometry. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, vol. 39 (11), pp. 1983–1991. DOI: 10.1364/JOSAA.470088.
14. Zhang P., Xie H., Xu T., Kong B. Calibration method for structured light projectors based on Hilbert transform and local homography. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Springer, 2025, vol. 116, pp. 19–31. DOI: 10.1007/978-981-96-5408-6_2.
15. Chen X., Wu J., Fan R., Liu Q., Xiao Y., Wang Y., Wang Y. Two-digit phase-coding strategy for fringe projection profilometry. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, vol. 70, pp. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2020.3032185.
16. Iwai D. Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2024, vol. 100 (3), pp. 234–251. DOI: 10.2183/pjab.100.012.

Для цитирования:

Шперлинг В.К., Ильиных С.П. Устранение нелинейности изображений // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 4 (100). – С. 137–146. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-137-146.

For citation:

Shperling V.K., Ilinykh S.P. Ustranenie nelineinosti izobrazhenii [Elimination of image nonlinearity]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2025, no. 4 (100), pp. 137–146. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-137-146.