

УДК 535.41: 778.38

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/116/01>

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ МЕТОД ФАЗОВОГО СДВИГА В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

©**Жумалиев К. М.**, SPIN-код: 6579-1960, д-р техн. наук, академик НАН КР,
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан, zhum_k_m@mail.ru

©**Тынышова Т. Д.**, ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-код: 9917-4190, канд. физ.-мат. наук,
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru

©**Исманов Ю. Х.**, ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук,
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан, i_yusupjan@mail.ru

©**Алымкулов С. А.**, SPIN-код: 2120-3954, д-р техн. наук, Кыргызский государственный
технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, salmor54@mail.ru

PARALLEL PHASE SHIFT METHOD IN DIGITAL HOLOGRAPHY

©**Zhumaliev K.**, SPIN-code: 6579-1960, Dr. habil., Academician of the National Academy of
Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,
Bishkek, Kyrgyzstan, zhum_k_m@mail.ru

©**Tynyshova T.**, ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-code: 9917-4190, Ph.D., Kyrgyz State
Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru

©**Ismanov Y.**, ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil., Kyrgyz State
Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, i_yusupjan@mail.ru

©**Alymkulov S.**, SPIN-code: 2120-3954, Dr. habil., Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, salmor54@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ параллельного метода фазового сдвига при записи и восстановлении голограмм с использованием пространственного мультиплексирования. Показано, что данный метод обладает значительными преимуществами по сравнению известными методами мультиплексирования голограмм. Среди важнейших преимуществ параллельного метода фазового сдвига его высокая скорость, так как в этом методе записи не требуются последовательные экспозиции, что делает его подходящим для исследования динамических процессов, таких как газовые потоки в аэродинамических трубах или плазма. Другим важным преимуществом этого метода записи голограмм является его устойчивость к вибрациям. При использовании данного метода все фазовые сдвиги регистрируются одновременно. Еще одно преимущество данного метода – это высокое разрешение, что позволяет точно восстанавливать фазы без искажений. Предложена математическая модель параллельного метода фазового сдвига при записи и восстановлении голограмм. Подробно проанализировано влияние шумов на качество записи голограмм. С этой целью значительное место в данной работе уделено калибровке оптической системы, что позволяет снизить влияние шумов на голографический процесс. Приведен пример результатов калибровки, которые показали, что характеристики голографического процесса значительно улучшаются при правильной настройке оптической системы.

Abstract. The article presents an analysis of the parallel phase-shifting method for hologram recording and reconstruction using spatial multiplexing. It is demonstrated that this method offers significant advantages over conventional holographic multiplexing techniques. Among the most important benefits of the parallel phase-shifting method is its high speed, as it eliminates the need for sequential exposures, making it suitable for studying dynamic processes such as gas flows in wind tunnels or plasma. Another key advantage of this holographic recording method is its vibration resistance. In this approach, all phase shifts are registered simultaneously. An additional strength of the method is its high resolution, enabling accurate phase reconstruction without distortion. A mathematical model of the parallel phase-shifting method for hologram recording and reconstruction is proposed. The influence of noise on hologram recording quality is analyzed in detail. To address this, a significant portion of the study focuses on optical system calibration, which helps reduce noise impact on the holographic process. An example of calibration results is provided, showing that proper optical system alignment substantially improves holographic process characteristics.

Ключевые слова: параллельный метод фазового сдвига, голограмма, мультиплексирование голограмм, калибровка, пространственный модулятор света.

Keywords: parallel phase-shifting method, hologram, hologram multiplexing, calibration, spatial light modulator.

В методе фазового сдвига как возможность однокадровой записи, так и способность цифровой голографии работать в реальном времени теряются из-за последовательной регистрации голограмм. Четыре голограммы записываются последовательно с использованием опорных волн, имеющих различный фазовый сдвиг: 0 , $\pi/2$, π и $3\pi/2$. Метод фазового сдвига позволяет получать изображения без шумов, но он непригоден для мгновенных измерений движущихся объектов. Хотя внеосевая цифровая голография является одним из возможных методов для мгновенного получения только дифрагированной волны первого порядка, у неё есть недостатки: требуется высокочувствительный сенсор для регистрации пространственных несущих полос, а также необходимо тщательно распределять пространственную полосу пропускания. В параллельном методе фазового сдвига в цифровой голографии четыре типа фазового сдвига выполняются одновременно для опорной волны в каждом сегменте, состоящем из 2×2 пикселей сенсора при записи голограммы. Таким образом, реализуются четыре процесса фазового сдвига с использованием техники пространственного мультиплексирования. Четыре голограммы, необходимые для фазово-сдвиговой интерферометрии, численно восстанавливаются из одной голограммы, записанной с опорной волной [1-3].

Цифровая голография позволяет восстанавливать амплитуду и фазу световой волны, рассеянной объектом. Однако традиционные методы фазового сдвига требуют последовательной записи нескольких голограмм с разными фазами опорного пучка, что замедляет процесс и делает его чувствительным к вибрациям [4-5].

Параллельный метод фазового сдвига решает эту проблему, позволяя регистрировать несколько фазовых сдвигов за одно экспонирование, что ускоряет запись и повышает точность. Вместо последовательной записи нескольких голограмм, параллельный метод фазового сдвига использует пространственное мультиплексирование. Опорный пучок разделяется на несколько каналов с разными фазовыми задержками (например, 0° , 60° , 120° , 180°), которые интерферируют с объектным пучком одновременно, но в разных

областях ПЗС-матрицы. В результате одного снимка получается набор интерференционных картин (голограмм) с разными фазовыми сдвигами. Среди важнейших преимуществ параллельного метода фазового сдвига его высокая скорость, так как в этом методе записи не требуются последовательные экспозиции, что делает его подходящим для исследования динамических процессов, таких как газовые потоки в аэродинамических трубах или плазма [6].

Другим важным преимуществом этого метода записи голограмм является его устойчивость к вибрациям. При использовании данного метода все фазовые сдвиги регистрируются одновременно [7].

Еще одно преимущество данного метода — это высокое разрешение, что позволяет точно восстанавливать фазы без искажений [8, 9].

Математическая модель параллельного метода фазового сдвига [10, 11].

Восстановление мультиплексированной голограммы, записанной параллельным методом фазового сдвига, сопровождается следующей последовательностью операций:

1. Сегментация голограммы — разделение изображения на области, соответствующие разным фазовым сдвигам.

2. Вычисление комплексного поля — использование алгоритмов фазового сдвига для восстановления амплитуды и фазы.

3. Цифровая восстановление изображения, которое подразумевает применение преобразования Френеля или углового спектра для получения 3D-изображения объекта.

Уравнение интерференции:

$$I_n(x, y) = |U(x, y) + R_n(x, y)|^2 = |U|^2 + |R_n|^2 + 2\text{Re}\{UR_n^*\},$$

где $U(x, y) = A_0 e^{i\varphi_0(x, y)}$ — объектная волна, $R_n(x, y) = A_r e^{i(\varphi_r + \Delta\varphi_n)}$ — опорная волна с фазовым сдвигом $\Delta\varphi_n$, n — номер канала фазового сдвига.

При восстановлении фазы для случая четырех каналов ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) фаза объекта вычисляется с помощью следующего соотношения:

$$\varphi_0(x, y) = \arctg\left(\frac{I_{90} - I_{270}}{I_0 - I_{180}}\right).$$

Амплитуда восстановленного изображения рассчитывается по формуле:

$$A_0 = \frac{\sqrt{(I_{90} - I_{270})^2 + (I_0 - I_{180})^2}}{4A_r}.$$

Ключевые компоненты системы записи голограмм параллельным методом фазового сдвига: когерентный источник света (обычно лазер); фазовый модулятор (например, жидкокристаллический модулятор или дифракционный оптический элемент) для создания нескольких фазовых сдвигов; оптические компоненты системы (делители пучка, зеркала) для разделения опорного пучка; ПЗС/КМОП-камера высокого разрешения для регистрации мультиплексированной голограммы.

Учет шумов и калибровка в параллельном методе фазового сдвига в цифровой голографии. При классификации источников шумов в параллельном методе фазового сдвига необходимо учитывать следующие основные источники шума: *фотонный шум*, который связан с квантовой природой света, иными словами — с дискретной природой света; *темновой шум камеры* — учитывается шум, вызванный тепловым движением электронов в материале сенсоров, в первую очередь в матрице ПЗС-камеры.

Неоднородность освещения, которую также можно рассматривать как шум. Данный вид шума вызван неравномерностью света, проходящего через пространственный модулятор света, или неравномерностью в сечении луча лазера.

Механические вибрации элементов оптической системы, следствием которых является размытие интерференционной картины.

Искажения, вызванные когерентностью света (излучение лазера). Обычно, это возникновение спеклов в интерференционной картине, возникающих за счет рассеяния на оптических элементах.

При калибровке оптических систем для параллельного метода сдвига фазы используют несколько основных методов [12].

1. Калибровка фазовых сдвигов, которая состоит из следующей последовательности действий: а) Запись серии голограмм без объекта при известных фазовых сдвигах (например, 0°, 90°, 180°, 270°). б) Расчёт реальных фазовых шагов через метод наименьших квадратов:

$$\Delta\varphi_n = \arctg \left(\frac{\langle I_n \sin(\varphi_{теор}) \rangle}{\langle I_n \cos(\varphi_{теор}) \rangle} \right).$$

в) При использовании мультиплексирования при записи голограмм необходима коррекция матрицы смешивания каналов.

2. Компенсация фоновой засветки:

а) Запись I_ϕ без объекта и опорного пучка).

б) Полиномиальная аппроксимация:

$$I_\phi(x, y) = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy.$$

в) Вычитание фона из голограмм:

$$I_{точн} = I_{исход} - I_\phi.$$

3. Калибровка оптического пути: а) Юстировка длины опорного плеча с точностью до $\lambda/10$ (используется интерферометр Майкельсона). б) Компенсация дисперсии призмами или хроматическими корректорами (для широкополосных источников).

Пример калибровки реальной системы для параллельного метода фазового сдвига. Используемое оборудование: Гелий-неоновый лазер: 639 нм, 50 мВт. Камера: Panasonic, разрешение 60 Мп. Пространственный модулятор света: HOLOEYE GAEA-2. Результаты калибровки представленной схемы записи голограмм с использованием параллельного метода фазового сдвига представлены в Таблице.

Таблица

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ

Параметр	До коррекции	После коррекции
Ошибка фазового сдвига	$\pm 5^\circ$	$\pm 0.3^\circ$
Неравномерность фона	15%	1%
Отношение сигнал/шум = $10 \lg \left(\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} \right)$ (дБ)	20	35

Выводы

Проведен анализ параллельного метода фазового сдвига при записи и восстановлении голограмм с использованием пространственного мультиплексирования.

Показано, что данный метод обладает значительными преимуществами по сравнению известными методами мультиплексирования голограмм. Среди важнейших преимуществ параллельного метода фазового сдвига его высокая скорость, так как в этом методе записи не требуются последовательные экспозиции, что делает его подходящим для исследования динамических процессов, таких как газовые потоки в аэродинамических трубах или плазма.

Другим важным преимуществом этого метода записи голограмм является его устойчивость к вибрациям. При использовании данного метода все фазовые сдвиги регистрируются одновременно. Еще одно преимущество данного метода — это высокое разрешение, что позволяет точно восстанавливать фазы без искажений.

Предложена математическая модель параллельного метода фазового сдвига при записи и восстановлении голограмм. Подробно проанализировано влияние шумов на качество записи голограмм.

Список литературы:

1. Jeon S. H., Gil S. K. Proposal for optical one-time password authentication using digital holography // Journal of the Optical Society of Korea. 2017. V. 20. №6. P. 722-732. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.6.722>
2. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography // Applied optics. 2013. V. 52. №1. P. A223-A231. <https://doi.org/10.1364/AO.52.00A223>
3. Xue K., Li Q., Li Y. D., Wang Q. Continuous-wave terahertz in-line digital holography // Optics Letters. 2012. V. 37. №15. P. 3228-3230. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003228>
4. Gross M. Heterodyne holography with full control of both the signal and reference arms // Applied optics. 2016. V. 55. №3. P. A8-A16. <https://doi.org/10.1364/AO.55.0000A8>
5. Jiang Z., Veetil S. P., Cheng J., Liu C., Wang L., Zhu J. High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging // Optics Express. 2015. V. 23. №16. P. 20916-20925. <https://doi.org/10.1364/OE.23.020916>
6. Wang Z., Jiang Z., Chen Y. Single-shot dual-wavelength phase reconstruction in off-axis digital holography with polarization-multiplexing transmission // Applied Optics. 2016. V. 55. №22. P. 6072-6078. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006072>
7. Jeon P., Lee H., Kim J., Liu C., Kim D. Analysis of three-dimensional mapping problems in incoherent digital holography // Optics Express. 2020. V. 28. №4. P. 4501-4515. <https://doi.org/10.1364/OE.384477>
8. Van Rooij J., Kalkman J. Sub-millimeter depth-resolved digital holography // Applied Optics. 2017. V. 56. №25. P. 7286-7293. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007286>
9. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра // Материалы X Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 445-446.
10. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
11. Исманов Ю. Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. №4. С. 30-33.
12. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography // Journal of applied physics. 1993. V. 74. №12. P. 7039-7043. <https://doi.org/10.1063/1.355041>

References:

1. Jeon, S. H., & Gil, S. K. (2017). Proposal for optical one-time password authentication using digital holography. *Journal of the Optical Society of Korea*, 20(6), 722-732. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.6.722>
2. Rivenson, Y., Stern, A., & Javidi, B. (2013). Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography. *Applied optics*, 52(1), A223-A231. <https://doi.org/10.1364/AO.52.00A223>
3. Xue, K., Li, Q., Li, Y. D., & Wang, Q. (2012). Continuous-wave terahertz in-line digital holography. *Optics Letters*, 37(15), 3228-3230. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003228>
4. Gross, M. (2016). Heterodyne holography with full control of both the signal and reference arms. *Applied optics*, 55(3), A8-A16. <https://doi.org/10.1364/AO.55.0000A8>
5. Jiang, Z., Veetil, S. P., Cheng, J., Liu, C., Wang, L., & Zhu, J. (2015). High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging. *Optics Express*, 23(16), 20916-20925. <https://doi.org/10.1364/OE.23.020916>
6. Wang, Z., Jiang, Z., & Chen, Y. (2016). Single-shot dual-wavelength phase reconstruction in off-axis digital holography with polarization-multiplexing transmission. *Applied Optics*, 55(22), 6072-6078. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006072>
7. Jeon, P., Lee, H., Kim, J., Liu, C., & Kim, D. (2020). Analysis of three-dimensional mapping problems in incoherent digital holography. *Optics Express*, 28(4), 4501-4515. <https://doi.org/10.1364/OE.384477>
8. Van Rooij, J., & Kalkman, J. (2017). Sub-millimeter depth-resolved digital holography. *Applied Optics*, 56(25), 7286-7293. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007286>
9. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2021). Uluchshenie kharakteristik interferogramm, poluchaemykh na vykhode golograficheskogo interferometra. In *Materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 445-446. (in Russian).
10. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umen'shenie ob"ema vvodimykh dannykh pri komp'yuternoi obrabotke interferogramm. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 695-696. (in Russian).
11. Исманов, Ю. Х. (2015). Восстановление изображения волнами различной длины. *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*, (4), 30-33. (in Russian).
12. Maripov, A., & Ismanov, Y. (1993). The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography. *Journal of applied physics*, 74(12), 7039-7043. <https://doi.org/10.1063/1.355041>

Работа поступила
в редакцию 27.04.2025 г.

Принята к публикации
07.05.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Жумалиев К. М., Тыншова Т. Д., Исманов Ю. Х., Алымкулов С. А. Параллельный метод фазового сдвига в цифровой голографии // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №7. С. 13-18. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/116/01>

Cite as (APA):

Zhumaliev, K., Tynyshova, T., Ismanov, Y., & Alymkulov, S. (2025). Parallel Phase Shift Method in Digital Holography. *Bulletin of Science and Practice*, 11(7), 13-18. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/116/01>