

УДК 535.41: 778.3

https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/02

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И ОТРАЖАЮЩИХ СРЕД МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ФАЗОВОГО СДВИГА В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

©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

©Джаманкызов Н. К., SPIN-код: 1471-6954, Scopus ID: 7801566578, д-р физ.-мат. наук,
Институт физики им. Ж. Жээнбаева НАН Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Кыргызстан, nasip49@gmail.com

©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

©Кайназаров А. Т., SPIN-код: 8765-4810, канд. техн. наук, Кыргызский
государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан, ascarkainaz@mail.ru

PARALLEL PHASE-SHIFTING DIGITAL HOLOGRAPHY FOR PHASE AND REFLECTIVE MEDIA

©Ismanov Yu., 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

©Dzhamankizov N., SPIN-code: 1471-6954, Scopus ID: 7801566578, Dr. habil.,
Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev of the National Academy of Sciences of
the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com

©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

©Kainazarov A., SPIN-code: 8765-4810, Ph.D., Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ascarkainaz@mail.ru

Аннотация. Представлен краткий обзор и анализ параллельного метода фазового сдвига в цифровой голографии, ориентированный на задачи количественного измерения фазовых объектов и отражающих поверхностей. Параллельные методы фазового сдвига (обеспечивают однокадровую регистрацию нескольких голограмм, фазы которых сдвинуты относительно друг друга, в одной экспозиции, что устранит необходимость во временной последовательности и делает возможными высокоточные измерения в условиях движения, дрожания или быстропротекающих процессов. Такие методы получили широкое развитие в последние годы благодаря появлению специализированных датчиков (например, с микрополяризационными элементами) и улучшенным алгоритмам обработки. Рассмотрены физические принципы параллельного фазового сдвига, математическое описание, основные схемы реализации с пространственным и поляризационным мультиплексированием, алгоритмы восстановления фазы и амплитуды, а также специфика применения к фазовым средам и отражающим объектам. Приводится обзор классических и современных работ, включая методы с камерой поляризационной матрицы, системами с двойной поляризационной регистрацией, расширением пространственной полосы пропускания и применением к динамическим объектам. Анализируются преимущества, ограничения и перспективы развития метода.

Abstract. This article presents a detailed review and analysis of the parallel phase-shifting method in digital holography, focused on the tasks of quantitative measurement of phase objects and reflective surfaces. Parallel phase-shifting methods (allow single-frame recording of multiple holograms, whose phases are shifted relative to each other, in a single exposure), eliminating the need for a time sequence and enabling high-precision measurements under conditions of motion, jitter, or fast processes. Such methods have been widely developed in recent years thanks to the advent of specialized sensors (e.g., with micro-polarization elements) and improved processing algorithms. The physical principles of parallel phase shifting, its mathematical formulation, and the main implementation schemes based on spatial and polarization multiplexing are discussed, along with algorithms for phase and amplitude reconstruction and the specifics of application to phase media and reflective objects. A review of classical and contemporary studies is provided, including methods using polarization matrix cameras, dual-polarization recording systems, spatial bandwidth expansion, and applications to dynamic objects. The advantages, limitations, and future development prospects of the method are analyzed.

Ключевые слова: цифровая голография, параллельный фазовый сдвиг, фазовая реконструкция, отражающие поверхности, поляризационная камера, пространственное мультиплексирование.

Keywords: digital holography, parallel phase shifting, phase reconstruction, reflective surfaces, polarization camera, spatial multiplexing.

Цифровая голография является мощным инструментом оптической метрологии, позволяющим одновременно регистрировать амплитуду и фазу волнового фронта, рассеянного объектом. Для многих приложений — например, измерения тонких фазовых объектов (биологических клеток, газовых потоков, волноводных структур) [1] и точной топографии отражающих поверхностей (микроскопические линзы, микро-электромеханические системы, промышленные детали) [2, 3] — требуется количественная фазовая информация. Методы фазового сдвига традиционно используются для точного восстановления фазы путём регистрации нескольких голограмм при различных фазовых сдвигах опорной волны [4, 5]. Однако последовательная регистрация делает такие методы чувствительными к вибрациям, флуктуациям источника и непригодными для динамических процессов [6, 7].

Параллельные методы фазового сдвига (обеспечивают однокадровую регистрацию нескольких голограмм, фазы которых сдвинуты относительно друг друга, в одной экспозиции, что устранил необходимость во временной последовательности и делает возможными высокоточные измерения в условиях движения, дрожания или быстропротекающих процессов. Такие методы получили широкое развитие в последние годы благодаря появлению специализированных датчиков (например, с микро-поляризационными элементами) и улучшенным алгоритмам обработки [8].

Классический фазовый сдвиг

В основе классической схемы фазового сдвига лежит регистрация серии голограмм $I_k(x, y)$, каждая из которых получена при фазовом сдвиге $\Delta\varphi_k$ опорной волны относительно объектной [9-10]: $I_k(x, y) = |O(x, y) + R(x, y, \Delta\varphi_k)|^2$, где $O(x, y) = A_o(x, y)e^{i\varphi_o(x, y)}$ — объектная волна, $R(x, y, \Delta\varphi_k) = A_r e^{i(\varphi_r + \Delta\varphi_k)}$ — опорная волна. Фазовый сдвиг обычно выбирается кратным $\pi/2$ или π , и по серии четырёх голограмм можно вычислить фазу

объектной волны как: $\varphi_o(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$ и амплитуду $A_o(x, y)$ по соответствующим комбинациям. Этот метод хорошо подавляет нулевой и сопряжённый порядки, но требует регистрации нескольких кадров во времени.

Параллельный фазовый сдвиг: общая формулировка

В параллельных методах фазовый сдвиг реализуется пространственным или поляризационным мультиплексированием, что позволяет получить несколько голограмм со сдвигом фазы относительно друг друга за одну экспозицию. При этом пространственная или поляризационная структура датчика разбивает регистрируемую область на подканалы, каждый из которых соответствует отдельному фазовому сдвигу. Для N-шагового метода с фазовыми сдвигами $\Delta\varphi_k = 2\pi k/N$, комплексная амплитуда объектной волны восстанавливается как: $O(x, y) = \frac{1}{NA_r} \sum_{k=0}^{N-1} I_k(x, y) e^{i\Delta\varphi_k}$, где интервалы фазовых сдвигов и веса выбираются специально для обеспечения ортогональности и устойчивости к шуму.

Реализации параллельного фазового сдвига

Поляризационные камеры. Наиболее распространённый подход к параллельному фазовому сдвигу реализуется с использованием датчиков с микрополяризационными элементами, где пиксели датчика снабжены встроенными микрополяризаторами с разными ориентациями (0° , 45° , 90° , 135°). Интерференция объекта и опорной волны с круговой поляризацией, разделённой на четыре компонента, приводит к тому, что каждый поднабор пикселей фиксирует голограмму с уникальным фазовым сдвигом. Затем из одной единственной экспозиции извлекаются четыре фазосмещённых голограммы.

Эта реализация подходит как для прозрачных фазовых объектов, так и для отражающих поверхностей, где требуется высокое значение отношения сигнал/шум и пространственное разрешение. Работы последних лет демонстрируют измерение плотности фазовых распределений микроструктур и топографии микро-оптических элементов. Например, использование поляризационной камеры для однокадрового измерения фазы микролинз показывает относительные ошибки на уровне сотых долей процента.

Пространственное мультиплексирование. Другой подход заключается в пространственном разделении фазосдвигаемых интерференционных картин на различные зоны детектора. Это может быть реализовано через оптические элементы, такие как фазовые решётки, делители на основе призм и многоканальные интерферометры, которые формируют несколько параллельных копий интерференционной картины с разными фазами на одной матрице. Такой подход был предложен, например, для систем с большим пространственным диапазоном записи.

Системы с несколькими камерами. Метод также реализуется через использование нескольких синхронизированных поляризационных камер, каждая из которых регистрирует фазосдвинутую компоненту интерференционной картины. Это позволяет расширить область применения на асимметричные объекты, где требуется дополнительная информация о фазе с разных направлений [9, 10].

Применение к фазовым средам и отражающим объектам

Фазовые объекты характеризуются пространственным распределением показателя преломления $n(x, y, z)$ или толщины $d(x, y)$, при этом амплитуда прошедшего

излучения остаётся практически неизменной. Информацию об объекте несёт фазовый сдвиг:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int (n(x, y, z) - n_0) dz.$$

Типичными фазовыми средами являются: прозрачные диэлектрики; биологические образцы; газовые и жидкостные потоки; термические и концентрационные поля. Преимущества параллельного фазового сдвига для фазовых сред определяют особенности требований к записи голограмм таких сред. Для фазовых объектов критичны: стабильность интерференции; высокое значение отношения сигнал/шум; отсутствие временных флуктуаций. Параллельный метод в значительной степени обеспечивает выполнение этих требований, так как реализует: одновременную регистрацию всех фазовых состояний; подавление фазовых ошибок, связанных с дрейфом опорного пучка; возможность исследования быстро изменяющихся фазовых распределений. Такие возможности дают возможность изучать методами цифровой голографии динамические среды, такие как турбулентные среды, тепловые поля, биодинамические процессы. Параллельный фазовый сдвиг широко применяется в цифровой голографической микроскопии и томографии фазовых сред, где требуется высокая воспроизводимость фазовых измерений [11, 12].

Однокадровая регистрация позволяет проводить многомерную реконструкцию без накопления ошибок между кадрами. При рассмотрении отражающих объектов в первую очередь необходимо учитывать, что для отражающих поверхностей фазовый сдвиг напрямую связан с топографией поверхности: $\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y)$, где $h(x, y)$ — высота поверхности. Метод параллельного фазового сдвига в цифровой голографии позволяет исследовать широкий класс отражающих поверхностей с высокой точностью, таких как микро- и наноструктурированные поверхности, оптические зеркала и элементы, инженерные и технические поверхности. Отражающие объекты часто подвержены вибрациям, имеют малые деформации (нм–мкм) и требуют высокой фазовой чувствительности. Параллельный фазовый сдвиг обеспечивает подавление ошибок из-за механических колебаний, высокую воспроизводимость фазовых карт и возможность анализа динамических режимов работы.

Ограничения и особенности интерпретации метода параллельного фазового сдвига в цифровой голографии

При параллельном фазовом сдвиге энергия опорного пучка распределяется между несколькими каналами, что приводит к снижению отношения сигнал/шум каждого интерференционного изображения. Это требует оптимизации оптической схемы, использования камер с низким шумом и корректного выбора экспозиции. Для фазовых и отражающих сред чувствительны отклонения фазовых сдвигов от номинальных значений, кросс-помехи между каналами и несовпадение пространственных частот. Эти эффекты необходимо учитывать при метрологическом анализе и оценке погрешностей.

Заключение

Параллельный метод фазового сдвига является универсальным инструментом количественной фазовой визуализации как для фазовых сред, так и для отражающих объектов. Его преимущества наиболее полно проявляются в условиях динамики, вибраций и малых фазовых изменений, что делает метод особенно актуальным для современных задач оптической метрологии и микросистемной техники.

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.
2. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography // *Applied optics*. 2012. 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*. 2015. 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., Тынышов Т. Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра // X международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М., 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., 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.
2. Rivenson, Y., Stern, A., & Javidi, B. (2012). 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. (2015). 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., & Tynyshov, T. D. (2021). Uluchshenie kharakteristik interferogramm, poluchaemykh na vykhode golograficheskogo interferometra. In *X Mezhdunarodnaya konferentsiya po fotonike i informatsionnoi optike* (pp. 445-446). (in Russian).

10. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umen'shenie ob"ema vvodimykh dannykh pri komp'yuternoi obrabotke interferogram. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 695-696. (in Russian).

11. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Vosstanovlenie izobrazheniya volnami razlichnoi dliny. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (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>

Поступила в редакцию
06.02.2026 г.

Принята к публикации
15.02.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Кайназаров А. Т. Исследование фазовых и отражающих сред методом параллельного фазового сдвига в цифровой голографии // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №4. С. 20-25. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/02>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., Dzhamankizov, N., Tynyshova, T., & Kainazarov, A. (2026). Parallel Phase-Shifting Digital Holography for Phase and Reflective Media. *Bulletin of Science and Practice*, 12(4), 20-25. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/02>