

## **Измерение модуляции фазового жидкокристаллического модулятора света Santec SLM-200 и анализ его применимости для реконструкции изображений с дифракционных элементов**

**Николай Николаевич Евтихийев<sup>1</sup>, Виталий Вячеславович Краснов<sup>2</sup>, Илья Павлович Рябцев<sup>3</sup>, Владислав Геннадьевич Родин<sup>4</sup>, Ростислав Сергеевич Стариков<sup>5</sup>, Павел Аркадьевич Черёмхин<sup>6</sup>**✉

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>1</sup>k1121@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25927827700>

<sup>2</sup>vitaly.krasnov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6985-9663>

<sup>3</sup>ilja.rjabcev0@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216989337>

<sup>4</sup>holo\_mephi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3667-8262>

<sup>5</sup>rstarikov@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602213431>

<sup>6</sup>cheremhinpavel@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3556-2663>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема достижения высокой стабильности и линейности фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света, широко применяемых для оптической реконструкции дифракционных оптических элементов, в том числе голограмм. В современных пространственно-временных модуляторах света высокого разрешения используется цифровая схема адресации сигналов, что приводит к флуктуациям фазового сдвига в течение кадра. Для современного фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света высокого разрешения Santec SLM-200 измерены зависимости фазового сдвига от уровня адресуемого сигнала и времени от начала кадра. С помощью модулятора света Santec SLM-200 выполнена оптическая реконструкция изображений с дифракционных элементов разного типа, оценена их дифракционная эффективность и качество реконструированных изображений. Получены значения дифракционной эффективности в диапазоне 3–10 %, наблюдается резкое падение яркости реконструированных изображений при удалении от оптической оси в плоскости реконструкции.

**Ключевые слова:** фазовый жидкокристаллический пространственно-временный модулятор света (ЖК ПВМС), флуктуации фазы, дифракционные оптические элементы, голограммы, киноформы, дифракционная эффективность

**Для цитирования:** Евтихийев Н. Н., Краснов В. В., Родин В. Г., Рябцев И. П., Стариков Р. С., Черёмхин П. А. Измерение модуляции фазового жидкокристаллического модулятора света Santec SLM-200 и анализ его применимости для оптической реконструкции изображений с дифракционных элементов // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 4–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-4-8>

## **Measurement of phase modulation of LCOS SLM Santec SLM-200 and analysis of its applicability for optical reconstruction of images from diffractive elements**

**Nickolay N. Evtikhiev<sup>1</sup>, Vitaly V. Krasnov<sup>2</sup>, Ilya P. Ryabcev<sup>3</sup>, Vladislav G. Rodin<sup>4</sup>, Rostislav S. Starikov<sup>5</sup>, Pavel A. Cheremkhin<sup>6</sup>**✉

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>1</sup>k1121@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25927827700>

<sup>2</sup>vitaly.krasnov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6985-9663>

<sup>3</sup>ilja.rjabcev0@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216989337>

<sup>4</sup>holo\_mephi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3667-8262>

<sup>5</sup>rstarikov@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602213431>

<sup>6</sup>cheremhinpavel@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3556-2663>

**Abstract.** Phase liquid crystal (LC) spatial light modulators (SLM) are widely used for optical reconstruction of diffraction optical elements, including holograms. For this purpose high stability and linearity of phase response of SLM is required. In modern high resolution SLM digital signal addressing scheme which leads to emergence of effect of phase shift fluctuations during frame time is applied. In this paper measurements of character and peculiarities of modulation of phase shift of modern high-resolution LC SLM Santec SLM-200 were performed. Optical reconstruction of images from diffraction elements of different types was carried out, the quality of reconstruction and diffraction efficiency were assessed.

**Keywords:** phase liquid crystal spatial light modulators (LC SLM), phase fluctuations, diffractive optical elements, holograms, kinoforms, diffraction efficiency

**Введение.** В настоящее время жидкокристаллические (ЖК) пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) [1, 2] широко распространены в различных областях науки и техники, таких как дифракционная оптика [1–3], оптическая метрология, цифровая и компьютерная голография [4–6]. Также эти приборы используются при кодировании волнового фронта [7], оптическом кодировании [8–13], измерении aberrаций [14] и др. Современные ЖК ПВМС характеризуются большим количеством пикселей (до  $10^7$ ), адресуемых градаций (до 1024) и глубиной модуляции фазы (до  $10\pi$ ) при типичной частоте смены кадров 60 Гц.

Как правило, в современных ЖК ПВМС осуществляется цифровая адресация сигналов, что позволяет реализовывать компактные контроллеры при большом количестве адресуемых пикселей. Частота адресации в ПВМС зависит от максимального количества адресуемых уровней фазы. Однако в процессе цифровой адресации в ЖК ПВМС ступенчатый профиль управляющего напряжения неизбежно вызывает флуктуации фазы [7].

Одним из основных требований для большинства научных приложений является именно высокая стабильность модуляции фазы, так как отклонение реального фазового сдвига от расчётного значения при реконструкции дифракционного оптического элемента приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и дифракционной эффективности. При этом, в частности, возникает нежелательный нулевой порядок дифракции в случае вывода киноформов [8]. Различные модели ЖК ПВМС подвержены данному эффекту в разной степени. Цель работы – измерение зависимостей фазового сдвига от уровня адресуемого сигнала и времени от начала кадра для современного ЖК ПВМС высокого разрешения Santec SLM-200 и оценка качества оптической реконструкции дифракционных оптических элементов этим прибором.

**Измерение зависимостей фазового сдвига ПВМС двухлучевым интерференционным методом.** Исследуемый ЖК ПВМС Santec SLM-200 (1920×1200 пикселей с шагом 8×8 мкм, глубина модуляции фазы не менее  $2\pi$  при длине волны не более 1550 нм) откалиброван на рабочую длину волны 532 нм с использованием прилагаемого программного обеспечения.

Измерения проводили методом двухлучевой интерферометрии [15–18]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Источником излучения служит неодимовый лазер с длиной волны 532 нм. Излучение лазера 1 расширяется и фильтруется линзами 2, 4 и микроапертурой 3. Далее пучок ограничивается диафрагмой 5 и попадает на дифракционную решётку 6. Линза 7 строит изображение диафрагмы в плоскости ПВМС 9 в каждом порядке дифракции решётки. Нулевой порядок блокируется непрозрачным экраном 10. Поляризатор 8 обеспечивает правильную работу ПВМС. Линза 11 собирает пучки, образованные первым и минус первым порядками дифракции, отражёнными

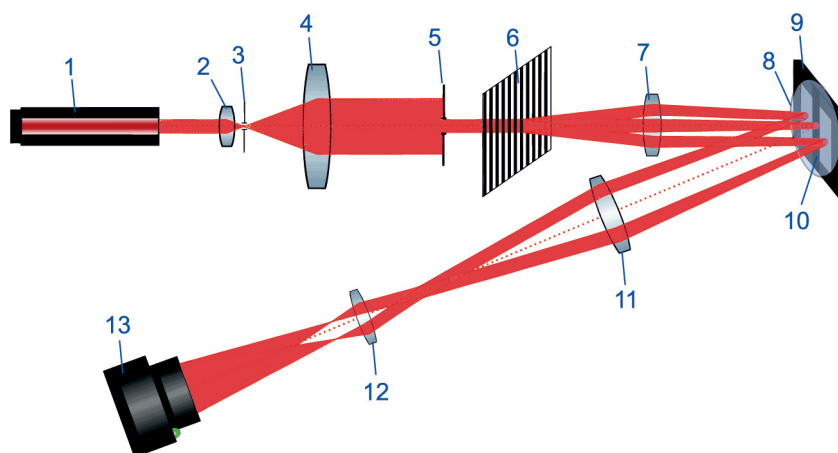


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения фазового сдвига пространственно-временного модулятора света: 1 – лазер; 2, 4, 7, 11, 12 – линзы; 3 – микроапертура; 5 – диафрагма; 6 – дифракционная решётка; 8 – поляризатор; 9 – пространственно-временной модулятор света; 10 – экран, блокирующий нулевой порядок дифракции; 13 – камера

Fig. 1. Schematic of the experimental setup for measuring the phase shift of the SLM: 1 – laser; 2, 4, 7, 11, 12 – lenses; 3 – pinhole; 5 – diaphragm; 6 – diffractive grating; 8 – polarizer; 9 – SLM; 10 – shield blocking zero diffraction order; 13 – camera

от ПВМС, в результате чего в плоскости их пересечения наблюдается интерференционная картина – изображение дифракционной решётки с удвоенной пространственной частотой. Для обеспечения требуемого разрешения установлена линза 12, которая строит увеличенное изображение интерференционной картины в плоскости фотосенсора камеры 13.

Применение в схеме для разделения пучка дифракционной решётки вместо классического экрана с двумя отверстиями обеспечивает дополнительную стабильность интерференционной картины. В этом случае интерференционная картина является изображением решётки, механические колебания элементов, расположенных перед решёткой, а также смещение лазерного пучка не оказывают никакого влияния на положение интерференционных полос.

При подаче на одну половину ПВМС сигнала определённого уровня, а на вторую половину – нулевого уровня, один из лучей приобретает некоторую фазовую задержку, в результате чего происходит сдвиг полос интерференционной картины. По значению сдвига можно однозначно определить набег фазы в одном из лучей.

Для измерения временной флуктуаций фазы в течение кадра (16,7 мс) использовали скоростную камеру высокого разрешения Flare 48MP. Режим съёмки – ROI, 2048×50 пикселей, скорость 2008 кадров в секунду. При этом в течение одного кадра снималось 33 интерференционных картины, для которых определялось смещение интерференционных полос. Каждую серию измерений повторяли четыре раза, найденные значения смещений усредняли, определяли погрешность измерения – среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов четырёх серий, ни разу не превысившее  $0,01\pi$ . Всего снято 33792 интерференционных картины.

Тестовые изображения имели вид прямоугольника, одна половина которого чёрная, а яркость второй половины соответствовала измеряемому уровню сигнала. Вывод тестовых изображений на ПВМС и съёмка интерференционных картин осуществлялись скриптом, написанным на скриптовом языке AutoHotkey (AutoHotkey Foundation LLC <https://www.autohotkey.com/>). Длительность измерения составляла около двух часов. Для исключения влияния внешних факторов (акустические колебания воздуха, вибрации и др.) все измерения проводили в пустом помещении.

Одна из отснятых интерференционных картин представлена на рис. 2. Период интерференционной картины 320 пикселей камеры обеспечивает разрешение по фазе  $0,006\pi$ . Смещение полос определяли следующим образом. Вначале для подавления высокочастотных шумов производили низкочастотную фильтрацию изображения, затем его построчное усреднение. Построчно усреднённые картины с фильтрацией и без неё также приведены на рис. 2. Далее определяли координаты основных максимумов (с интенсивностью не менее 0,5) и близлежащих минимумов интерференционной картины – всего порядка 10 значений. Из полученных координат вычитали координаты «нулевой» картины, в результате получали смещения полос, которые усредняли, сравнивали со смещением в предыдущей градации и в случае скачка на период этот скачок компенсировали.

Зависимости фазового сдвига от уровня сигнала, усреднённые по времени в течение кадра (по 33 снимкам), а также зависимости фазового сдвига от уровня сигнала и времени в течение кадра для исследуемого ПВМС приведены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что ПВМС Santec SLM-200 обеспечивает всего восемь уровней фазового сдвига. Наблюдаются нарушения монотонности зависимости фазового сдвига от уровня сигнала, что без дополнительной коррекции может негативно сказаться на качестве реконструкции дифракционного оптического элемента и дифракционной эффективности.

Для исследования временной стабильности фазовой модуляции ПВМС измерены зависимости флуктуаций фазового

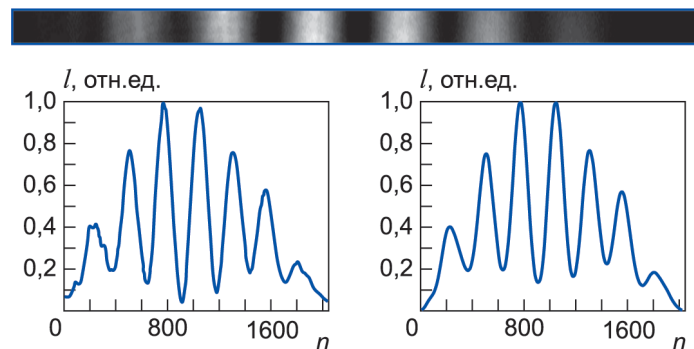


Рис. 2. Зарегистрированная интерференционная картина (вверху) и результаты её построчного усреднения без фильтрации (слева) и с фильтрацией (справа);  $I$  – интенсивность,  $n$  – номер столбца

Fig. 2. An example of a captured interference pattern (top), result of its averaging over rows with filtration (right) and without it (left);  $I$  – intensity in arbitrary units,  $n$  – column number

сдвига от уровня поданного сигнала (рис. 4). Значение флуктуаций определяли как СКО фазового сдвига в различные моменты времени при фиксированном уровне сигнала. Уровень флуктуаций фазы в течение кадра составил не более  $0,01\pi$ , что соответствовало пределам погрешности измерений.

**Анализ качества реконструкции дифракционных оптических элементов исследуемым ПВМС.** Для оценки качества оптической реконструкции изображений выводили различные дифракционные оптические элементы: цифровые голограммы и киноформы. Используемые цифровые голограммы Френеля экспериментально зарегистрированы камерой, расстояние до объекта 1 м [19]. Киноформы численно синтезированы для восстановления изображений также в зоне дифракции Френеля при расстоянии 1 м от объекта до плоскости ПВМС.

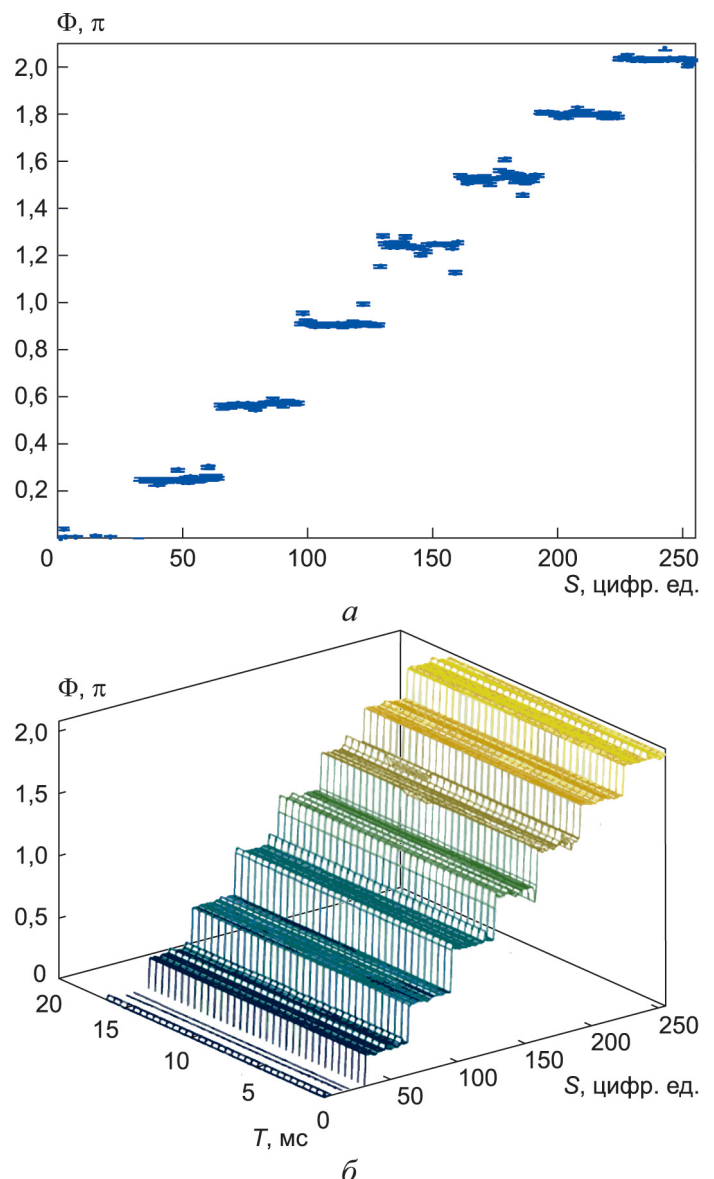


Рис. 3. Измеренные зависимости фазового сдвига  $\Phi$  от уровня сигнала  $S$  – усреднённая по времени в течение кадра  $T$  (а) и полная (б)

Fig. 3. Measured dependences of the phase shift  $\Phi$  on the signal level  $S$  – averaged over frame time  $T$  (a) and full one (b)

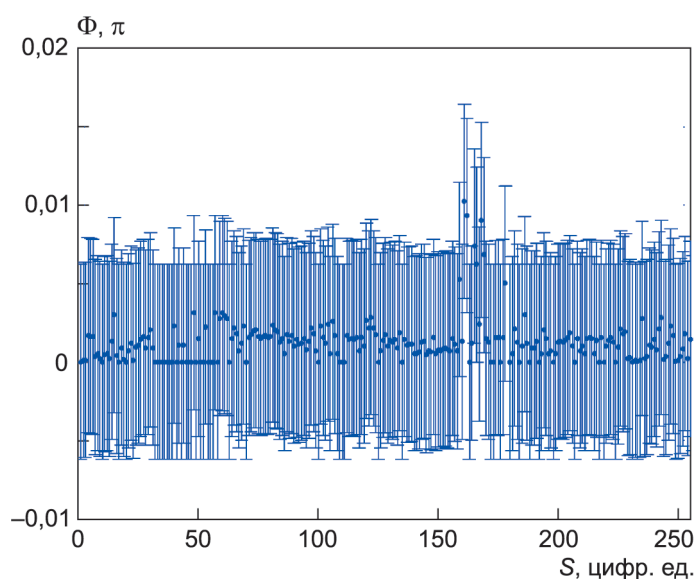


Рис. 4. Измеренные зависимости флуктуаций  $\varphi$  фазового сдвига от уровня  $S$  поданного сигнала

Fig. 4. Measured dependences of phase shift fluctuations  $\varphi$  on the level of the addressed signal  $S$

Все дифракционные оптические элементы содержали  $1080 \times 1080$  элементов и 256 градаций фазы. Первый порядок дифракции голограммы располагался справа от нулевого, первый порядок киноформов – в правом нижнем квадранте поля реконструкции. Полученные восстановленные изображения регистрировали цифровой камерой Flare 48MP с длительностью экспозиции 16,7 мс. Интенсивность освещения ПВМС регулировали изменением мощности излучения лазера. Результаты оптической реконструкции цифровой голограммы и киноформов полутонного и бинарного объектов представлены на рис. 5.

Дифракционную эффективность оценивали следующим образом. Снимали изображение, восстановленное с дифракционного оптического элемента. Перед ПВМС помещали зеркало, время экспозиции уменьшали до значений, обеспечивающих линейный уровень сигнала камеры, и производили съёмку. По снимку определяли мощность падающего светового пучка как отношение суммарной яркости в пучке к времени экспозиции. Аналогичным образом определяли мощность пучка в первом порядке дифракции. Дифракционную эффективность находили как отношение мощности в первом порядке дифракции к полной мощности светового пучка.

При оптическом восстановлении изображений с голограммы и киноформов дифракционная эффективность составила  $0,1$  и  $0,06 \pm 0,03$  соответственно. Существенное затемнение в области правого нижнего угла изображений, восстановленных с киноформов, обусловлено большим удалением изображений от оптической оси схемы в плоскости реконструкции по сравнению с аналогичными параметрами для голограммы, в сочетании с большим окном пропускания пикселей ПВМС – размер пиксела  $7,8 \times 7,8$  мкм при шаге пикселей  $8,0 \times 8,0$  мкм.

**Заключение.** По измеренным зависимостям фазового сдвига от уровня адресуемого сигнала и времени от начала кадра современного ЖК ПВМС высокого разрешения Santec SLM-200

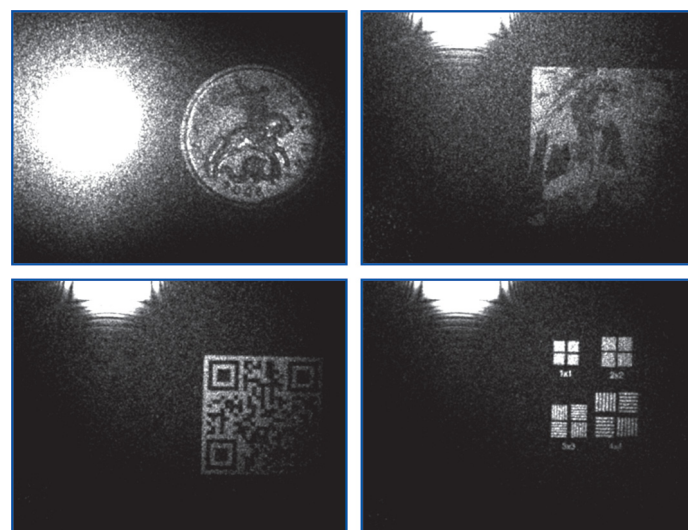


Рис. 5. Результаты оптической реконструкции изображений с голограммы (вверху слева) и трёх киноформов на пространственно-временном модуляторе света Santec SLM-200

Fig. 5. Results of optical reconstruction of images from the hologram (top left) and three kinoforms using spatial light modulator Santec SLM-200

установлено, что это устройство обеспечивает всего восемь уровней фазового сдвига, также наблюдаются нарушения монотонности зависимости фазового сдвига Santec SLM-200 от уровня сигнала. По результатам оптической реконструкции объектов с цифровых голограмм и синтезированных дифракционных элементов получены значения дифракционной эффективности в диапазоне 3–10 %, что является небольшим результатом для фазовых дифракционных элементов, кроме того, резко уменьшается яркость изображений по мере удаления элементов изображения в плоскости реконструкции от оптической оси, что существенно ограничивает полезную область поля реконструкции.

Таким образом, авторами настоящей статьи показана низкая эффективность исследованного модулятора света Santec SLM-200 при оптической реконструкции изображений с многоградационных фазовых дифракционных элементов, что обусловлено малым количеством уровней модуляции фазы и нарушением монотонности фазового сдвига исследованного модулятора света несмотря на его высокое разрешение и стабильность фазовой модуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

#### Список литературы

1. Lalor M. J., *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications*, ed. Turunen J., Wyrowski F., Berlin, Akademie Verlag, 1997, 426 p.
2. Wu S. T., Yang D. K., *Reflective Liquid Crystal Displays*, ed. Wu S. T., Chichester, John Wiley and Sons Inc., 2005, 335 p.
3. Котова С. П., Майорова А. М., Самагин С. А. Возможность формирования двухлепестковых вихревых световых полей с помощью модифицированного ЖК фокусатора // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 1. С. 18–23. <https://doi.org/10.21883/OS.2019.01.47047.256-18>

4. Schnars U., Jueptner W., *Digital holography: Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*, Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, 164 p.
5. Zwick S., Haist T., Warber M., Osten W., *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 25, pp. F47–F58. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000F47>
6. Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Cheryomkhin P. A., Krasnov V. V., Rodin V. G., *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8429, pp. 84291M. <https://doi.org/10.1117/12.922612>
7. Hermerschmidt A., Osten S., Krüger S., Blümel T., *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6584, p. 65840E. <https://doi.org/10.1007/b138284>
8. Бондарева А. П., Евтихьев Н. Н., Краснов В. В., Стариков С. Н. Применение фазового модулятора света в схеме оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8-9. С. 693–701.
9. Javidi B., Carnicer A., Yamaguchi M., *J. Opt.*, 2016, vol. 18, pp. 083001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/083001>
10. Dou S., Shen X., Zhou B., Wang L., Lin C., *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 112, pp. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.11.004>
11. Peng X., Zhang P., Cai L., *Proc. SPIE*, 2004, vol. 115, pp. 420–426. <https://doi.org/10.1117/12.571875>
12. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Laser Phys. Lett.*, 2020, vol. 17, pp. 025204. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab644c>
13. Jaramillo-Osorio A., Barrera-Ramírez J. F., Mira-Agudelo A. et al., *J. Opt.*, 2020, vol. 22, pp. 035702. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab68f0>
14. Ручка П. А., Вереникина Н. М., Гриценко И. В. и др. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение корреляционного детектирования в голографических датчиках волнового фронта // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 4. С. 563–569. <https://doi.org/10.21883/OS.2019.10.48358.172-19>
15. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9006, pp. 900615. <https://doi.org/10.1117/12.2037569>
16. Goncharov D. S., Krasnov V. V., Ponomarev N. M., Starikov R. S., *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10558, pp. 105580Y. <https://doi.org/10.1117/12.2290043>
17. Пнев А. Б., Борисова А. В., Денисова Я. А. и др. Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха-Цендера на основе волокна с сохранением поляризации // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 37–42. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-5-37-42>
18. Гончаров Д. С., Евтихьев Н. Н., Краснов В. В. и др. Влияние дополнительной фазовой модуляции амплитудных жидкокристаллических ПВМС на характеристики распознавания изображений в инвариантном оптико-цифровом корреляторе // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 2. С. 200–208. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208>
19. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9889, pp. 98891M. <https://doi.org/10.1117/12.2227767>

## References

1. Lalor M. J., *Diffraction Optics for Industrial and Commercial Applications*, ed. Turunen J., Wyrowski F., Berlin, Akademie Verlag, 1997, 426 p.
2. Wu S. T., Yang D. K., *Reflective Liquid Crystal Displays*, ed. Wu S. T., Chichester, John Wiley and Sons Inc., 2005, 335 p.
3. Kotova S. P., Maiorova A. M., Samagin S. A., *Optics and Spectroscopy*. 2019, vol. 126, no 1, pp. 10–15. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19010089>
4. Schnars U., Jueptner W., *Digital holography: Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*, Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, 164 p.
5. Zwick S., Haist T., Warber M., Osten W., *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 25, pp. F47–F58. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000F47>
6. Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Cheryomkhin P. A., Krasnov V. V., Rodin V. G., *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8429, pp. 84291M. <https://doi.org/10.1117/12.922612>
7. Hermerschmidt A., Osten S., Krüger S., Blümel T., *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6584, p. 65840E. <https://doi.org/10.1007/b138284>
8. Bondareva A. P., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V., Starikov S. N., *Radiophys. Quantum Electron.* 2015, vol. 57, no. 8-9, pp. 619–626. <https://doi.org/10.1007/s11141-015-9547-8>
9. Javidi B., Carnicer A., Yamaguchi M., *J. Opt.*, 2016, vol. 18, pp. 083001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/083001>
10. Dou S., Shen X., Zhou B., Wang L., Lin C., *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 112, pp. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.11.004>
11. Peng X., Zhang P., Cai L., *Proc. SPIE*, 2004, vol. 115, pp. 420–426. <https://doi.org/10.1117/12.571875>
12. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Laser Phys. Lett.*, 2020, vol. 17, pp. 025204. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab644c>
13. Jaramillo-Osorio A., Barrera-Ramírez J. F., Mira-Agudelo A. et al., *J. Opt.*, 2020, vol. 22, pp. 035702. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19100230>
14. Ruchka P. A., Verenikina N. M., Gritsenko I. V. et al., *Opt. Spectrosc.*, 2019, vol. 127, no. 4, pp. 563–569. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19100230>
15. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9006, pp. 900615. <https://doi.org/10.1117/12.2037569>
16. Goncharov D. S., Krasnov V. V., Ponomarev N. M., Starikov R. S., *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10558, pp. 105580Y. <https://doi.org/10.1117/12.2290043>
17. Pnev A. B., Borisova A. V., Denisova Y. A. et al., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 467–473. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1453-y>
18. Goncharov D. S., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Comput. Opt.*, 2019, vol. 43, pp. 200–208. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208>
19. Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al., *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9889, pp. 98891M. <https://doi.org/10.1117/12.2227767>

Статья поступила в редакцию 01.01.2021; принята к публикации 01.03.2021.