

УДК 535.41: 778.38

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/79/01>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызстан, [i\\_yusupjan@mail.ru](mailto:i_yusupjan@mail.ru)

©Тынышова Т. Д., канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызстан, [ttynyshova@mail.ru](mailto:ttynyshova@mail.ru)

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF A HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER

©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil., Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan, [i\\_yusupjan@mail.ru](mailto:i_yusupjan@mail.ru)

©Tynyshova T., Ph.D., Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan, [ttynyshova@mail.ru](mailto:ttynyshova@mail.ru)

*Аннотация.* Разработка методов повышения чувствительности интерферометров, предназначенных для исследования сложных фазовых сред, которые характеризуются резкими изменениями внутренних неоднородностей, является весьма актуальной задачей. Целью исследования, результаты которого представлены в статье, является теоретический анализ возможности улучшения чувствительности выходных данных голографического интерферометра с использованием цифровых методов обработки оптической информации. Результаты исследований показали, что наличие цифровой информации об объектных и опорных волнах, о зафиксированной ПЗС-матрицей интерференционной картине позволяет производить над этими данными различные математические операции, после которых их снова можно вывести на экран, т. е. визуализировать. Указанные операции можно проводить как на участках от объекта до выходной плоскости, так и на выходе системы, непосредственно с распределением интенсивности, которое фиксирует ПЗС матрица. Предложена последовательность численных операций, позволяющая увеличить чувствительность голографической системы в  $2^m$  раз, где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Также показано, что увеличение чувствительности по указанной схеме ограничено только возможными спекл-шумами, которые могут ухудшить контраст полос интерференционной картины. Предложенный метод повышения чувствительности интерферометра, в отличие от известных, не опирается на аппаратные изменения интерферометрических систем, что сопряжено с большими затратами, а цифровыми методами улучшает характеристики выходных данных низкочувствительных интерферометров. Результаты работы могут быть использованы при исследованиях сложных фазовых сред.

*Abstract.* The development of methods for increasing the sensitivity of interferometers intended for studying complex phase media, which are characterized by abrupt changes in internal inhomogeneities, is a very urgent task. The aim of the study, the results of which are presented in the article, is a theoretical analysis of the possibility of improving the sensitivity of the output data of a

holographic interferometer using digital methods of processing optical information. The research results showed that the presence of digital information about the object and reference waves and about the interference pattern recorded by the CCD matrix allows performing various mathematical operations on these data, after which they can again be displayed on the screen, i. e., visualized. These operations can be carried out both in the sections from the object to the output plane, and at the output of the system, directly with the intensity distribution, which is fixed by the CCD matrix. A sequence of numerical operations is proposed, which makes it possible to increase the sensitivity of the holographic system by a factor of  $2^m$ , where  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ . It is also shown that the increase in sensitivity according to the indicated scheme is limited only by possible speckle noise, which can worsen the contrast of the fringes of the interference pattern. The proposed method for increasing the sensitivity of the interferometer, in contrast to the known ones, does not rely on hardware changes in interferometric systems, which is associated with high costs, but digitally improves the characteristics of the output data of low-sensitivity interferometers. The results of the work can be used in studies of complex phase media.

*Ключевые слова:* голографическая интерферометрия, чувствительность голографической системы, ПЗС матрица, цифровые методы, преобразование Френеля, преобразование Фурье, объектная волна, опорная волна.

*Keywords:* holographic interferometry, holographic system sensitivity, CCD matrix, digital methods, Fresnel transform, Fourier transform, object wave, reference wave.

#### *Введение*

Для измерения оптических плотностей динамических фазовых сред, подобных плазме или сложных аэродинамических потоков, хорошо подходят интерферометрические методы [1–3]. Однако, учитывая такую особенность подобных сред, как, в большинстве случаев, наличие только небольших градиентов показателя преломления, можно сделать вывод, что чувствительность классических интерферометров недостаточна для регистрации распределения плотности в подобных фазовых средах [4–6]. В принципе, чувствительность классических методов интерферометрии может повыситься. Надо учитывать, что в классической интерферометрии любое изменение волнового фронта определяется оптическим методом, что позволяет использовать именно оптические методы повышения чувствительности. В первую очередь, это возможность увеличить число проходов волны в интерферометре. Можно использовать сложение различных интерференционных порядков, как это сделано в многоканальном голографическом интерферометре [7–9]. Можно использовать методы многоволновой интерферометрии, различные нелинейные эффекты и др. [10–12]. Причем все эти методы могут быть использованы, как для увеличения чувствительности классических методов интерферометрии, так и для уменьшения их [13–15]. Однако развитие информационных технологий позволяет добиваться подобных результатов посредством различных трансформаций записанного и оцифрованного изображения интерференционной картины. Переход к цифровым методам обработки интерферограмм особенно эффективен в голографической интерферометрии, так как цифровые методы голографии очень хорошо отработаны, а сами методы голографической интерферометрии оказываются значительно более чувствительными. Т. е. добиться наибольшей эффективности чувствительности интерференционных методов измерения параметров фазовых сред можно, используя, в первую очередь, методы цифровой голографической интерферометрии.

Целью исследования, рассматриваемого в статье, является теоретическое обоснование возможности улучшения чувствительности методов цифровой голографической интерферометрии, что позволит определять очень малые колебания неоднородностей исследуемых фазовых сред.

*Теоретическое обоснование возможности повышения чувствительности метода двух экспозиций*

Рассмотрим классическую схему записи квази-Фурье голограммы. В этой схеме внеосевой точечный опорный источник и объект, который в общем случае может быть либо непрозрачным, либо прозрачным, размещены в одной плоскости, которую можно назвать входной плоскостью системы. В качестве выходной плоскости, в случае цифровой голографии, обычно берут плоскость датчиков ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрицы. Обозначим расстояние между входной плоскостью системы и плоскостью ПЗС матрицы через  $l$ . Систему координат во входной плоскости обозначим  $(x_0, y_0)$ , в выходной плоскости  $(x, y)$ . Математически входную плоскость можно представить, как

$$v(x_0, y_0, z_0) = \delta(x_0 - X, y_0 - Y) + u(x_0, y_0). \quad (1)$$

Здесь  $(X, Y)$  — координаты положения точечного источника во входной плоскости, — волна, идущая от объекта,  $\delta(x_0 - X, y_0 - Y)$  — дельта-функция, описывающая точечный источник. Расстояние между входной и выходной плоскостями такое, что плоскость, в которой находится ПЗС матрица, задает область Френеля. Т. е. поле световой волны в плоскости ПЗС матрицы можно находить, используя приближение Френеля.

$$v_z(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{ikz} \iint_{\infty} v(x_0, y_0, z_0) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0. \quad (2)$$

Выражение (2) — представляет собой дифракционный интеграл в виде преобразования Френеля, который получается, как параксиальное приближение общего дифракционного интеграла [9].

Здесь  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число,  $\lambda$  — длина световой волны,  $z$  — координата на оси, вдоль которой распространяется световая волна. Преобразование Френеля можно свести к преобразованию Фурье [16-17]

$$\begin{aligned} v_z(x, y, z) &= \frac{\exp(ikz)}{ikz} \iint_{\infty} v(x_0, y_0, z_0) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 = \\ &= \frac{\exp(ikz)}{ikz} \exp\left\{\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \iint_{\infty} v(x_0, y_0, z_0) \exp\left\{\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{-\frac{i2\pi(x_0 x + y_0 y)}{\lambda z}\right\} dx_0 dy_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Такой переход позволит использовать хорошо известные свойства преобразования Фурье, а в случае цифровой голографии использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье.

Распределение интенсивности, зафиксированное ПЗС матрицей, представляющее собой интерференционную картину, по сути, есть цифровая голограмма. Если к такой голограмме применить операцию обратного преобразования Френеля, а в нашем случае это действие сводится к обратному преобразованию Фурье, то мы можем получить восстановленные

мнимое и действительное изображения исходного объекта и, также, нулевой дифракционный порядок. Аналитически эта процедура может быть описана следующим образом

$$v(x_0, y_0, z_0) = \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \iint_{\infty} v_z(x, y, z) \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx dy = \tag{4}$$

$$= \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z_0}\right\} \iint_{\infty} v_z(x, y, z) \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx dy$$

Если речь идет о распределении интенсивности в плоскости голограммы или, в нашем случае, в плоскости ПЗС матрицы, то распределение интенсивности светового поля, которое, по сути, представляет собой интерференционную картину, фиксируемую ПЗС матрицей, имеет вид

$$I(x, y) = |v(x, y)|^2 \tag{5}$$

Исходя из формулы (1), можем записать для интенсивности

$$I(x, y) = I_u(x, y), \text{ где } I_u(x, y) = |u(x, y)|^2. \tag{6}$$

Рассмотрим применимость указанных формул в цифровой голографической интерферометрии.

Изменим фазу объектной волны на  $\Delta\theta(x_0, y_0)$ . Тогда объектная волна во входной плоскости имеет вид  $u'(x_0, y_0) = a \exp[i\theta(x_0, y_0) + i\Delta\theta(x_0, y_0)]$ . В этом случае объектная волна в плоскости записи голограммы имеет вид

$$v(x, y, z) = \tag{7}$$

$$= \frac{\exp(ikz)}{ikz} \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \iint_{\infty} |u(x_0, y_0)| \exp[i\theta(x_0, y_0) + i\Delta\theta(x_0, y_0)] \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx_0 dy_0$$

Если рассматривать случай двух экспозиций, используемый в голографической интерферометрии, то математически это означает восстановление суммы двух волн – исходной  $u(x, y)$  и с измененной фазой  $u'(x, y)$ . Так как интерференционная картина фиксируется в виде распределения интенсивностей, то

$$I(x, y) = [u(x, y) + u'(x, y)][u(x, y) + u'(x, y)]^* = \tag{8}$$

$$= \{a \exp[-i\theta(x, y)] + a \exp[-i\theta(x, y)] \exp[-i\Delta\theta(x, y)]\} \times$$

$$\times \{a \exp[i\theta(x, y)] + a \exp[i\theta(x, y)] \exp[i\Delta\theta(x, y)]\} =$$

$$= 2a^2 + a^2 \{ \exp[i\Delta\theta(x, y)] + \exp[-i\Delta\theta(x, y)] \}$$

Воспользуемся формулой Эйлера для перехода от комплексной формы записи интенсивности к ее действительной форме

$$I(x, y) = 2a^2 + 2a^2 \cos[\Delta\theta] \tag{9}$$

Исходя из соотношений (6) выражение (9) можно представить в виде

$$I_{\Sigma} = I_u(x, y)B_{\Sigma}\{1 + \cos[\Delta\theta(x, y)]\} \quad (10)$$

где  $B_{\Sigma}$  — некоторый действительный коэффициент, описывающий полную, т.е. суммарную яркость изображения,  $I_{\Sigma}$  — изображение восстановленного объекта, модулированное полосами интерференции, в случае обычной, не улучшенной чувствительности.

При необходимости нахождения по отдельности значений интенсивности  $I_{\Sigma}$  и соответствующего ей значения фазового сдвига  $\Delta\theta(x, y)$  можно воспользоваться следующими соотношениями

$$I_u(x_0, y_0) = |F^{-1}\{v(x, y)\}|^2 \quad (11)$$

$$\exp[i\Delta\theta(x_0, y_0)] = \frac{F^{-1}\{v'(x, y)\}}{F^{-1}\{v(x, y)\}} \quad (12)$$

Здесь  $F^{-1}$  означает оператор обратного преобразования Фурье, а  $F$ , соответственно, описывает оператор прямого преобразования Фурье.

Как видно из соотношений (11) и (12) они содержат существенную информацию об амплитудах и фазовых характеристиках волн, образующих интерференционную картину.

Рассмотрим возможность повышения чувствительности интерференционной системы.

Наличие цифровой информации об объектных и опорных волнах, о зафиксированной ПЗС-матрицей интерференционной картине позволяет производить над этими данными различные математические операции, после которых их снова можно вывести на экран, т. е. визуализировать. Указанные операции можно проводить как на участках от объекта до выходной плоскости, так и на выходе системы, непосредственно с распределением интенсивности, которое фиксирует ПЗС матрица. Это такие операции, как цифровая фильтрация, свертки и др.

Проведем последовательность следующих математических операций над данными, полученными на выходе нашей интерферометрической системы:

1. Произведем операцию вычитания световых полей от исходного объекта и объекта с измененной фазой в выходной плоскости. Полученный результат восстановим, т. е., в нашем случае это операция обратного преобразования Фурье, и, затем, представим результат в виде распределения интенсивности для разности световых полей.

$$\begin{aligned} \Delta v(x_0, y_0, z_0) &= \quad (13) \\ &= \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [v'_z(x, y, z) - v_z(x, y, z)] \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx dy = \\ &= \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z_0}\right\} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [v'_z(x, y, z) - v_z(x, y, z)] \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx dy \end{aligned}$$

Распределение интенсивности найдем в виде соотношения

$$I_1(x_0, y_0) = |\Delta v(x_0, y_0, z_0)|^2 = [\Delta v(x_0, y_0, z_0)][\Delta v(x_0, y_0, z_0)]^* \quad (14)$$

так как в общем случае  $\Delta v(x_0, y_0, z_0)$  комплексное выражение. Для выходной плоскости выражение (14) можно представить, по аналогии с выражением (10), в следующем виде

$$I_1(x, y) = I_u(x, y)B_\Sigma\{1 - \cos[\Delta\theta(x, y)]\} \quad (15)$$

2. Вычитаем из соотношения (10) выражение (15). Полученный результат возводим во вторую степень

$$\begin{aligned} I_2 &= [I_\Sigma(x, y) - I_1(x, y)]^2 = & (16) \\ &= \{I_u(x, y)B_\Sigma\{1 + \cos[\Delta\theta(x, y)]\} - I_u(x, y)B_\Sigma\{1 - \cos[\Delta\theta(x, y)]\}\}^2 = \\ &= \{2I_u(x, y)B_\Sigma \cos[\Delta\theta(x, y)]\}^2 = \\ &= I_u^2(x, y)B_\Sigma^2\{2 \cos[\Delta\theta(x, y)]\}^2 = \\ &= 2I_u^2(x, y)B_\Sigma^2\{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\} = \\ &= I_u^2(x, y)\frac{B_\Sigma^2}{2}\{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\} = I_u^2(x, y)B_2\{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\} \end{aligned}$$

Из соотношения (16) видно, что последовательность проведенных операций увеличивает сдвиг фаз между исходной и искаженной волнами в два раза, что приводит к увеличению частоты интерференционных полос в выходной плоскости также в два раза. Т. е. чувствительность голографического интерферометра увеличивается в два раза. Интерферометр может уловить неоднородности в фазовой среде, величина которых в два раза меньше, чем до проведения рассмотренных математических операций.

Перемножим соотношения (10) и (15)

$$\begin{aligned} I_3 &= I_z(x, y)I_1(x, y) = (I_u(x, y)B_\Sigma\{1 + \cos[\Delta\theta(x, y)]\}) * & (17) \\ &* (I_u(x, y)B_\Sigma\{1 - \cos[\Delta\theta(x, y)]\}) = \\ &= I_u^2(x, y)B_\Sigma^2\{1 - \cos^2[\Delta\theta(x, y)]\} = I_u^2(x, y)\frac{B_\Sigma^2}{2}\{1 - \cos[2\Delta\theta(x, y)]\}. \end{aligned}$$

Проведем последовательность действий аналогичных тем, что провели для получения соотношения (16), т. е. вычтем из выражения (16) соотношение (17), и полученный результат возведем в квадрат

$$\begin{aligned} I_4 &= [I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2 = & (18) \\ &= (I_u^2(x, y)\frac{B_\Sigma^2}{2}\{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\} - I_u^2(x, y)\frac{B_\Sigma^2}{2}\{1 - \cos[2\Delta\theta(x, y)]\})^2 = \\ &= I_u^4(x, y)\frac{B_\Sigma^4}{4}4 \cos^2[2\Delta\theta(x, y)] = I_u^4(x, y)\frac{B_\Sigma^4}{2}\{1 + \cos[4\Delta\theta(x, y)]\}. \end{aligned}$$

Если соотношение (16) увеличивает чувствительность интерференционной системы в два раза, то из выражения (18) видно, что в этом случае разность фаз опорной, т. е. исходной объектной волны, и волны с измененной фазой увеличивается в четыре раза. Как следствие, в четыре раза увеличивается пространственная частота интерференционной картины, локализованной на восстановленном действительном изображении исследуемого объекта.

В обобщенном виде предложенную для  $I_2$  и  $I_4$  схему увеличения чувствительности голографической интерференционной системы, можно представить в следующем образом

$$I_{2^m} = I_u^{2^m} \frac{B_\Sigma^{2^m}}{2} \{1 + \cos[2^m \Delta\theta(x, y)]\}. \quad (19)$$

Здесь  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Из соотношения (19) видно, что численное увеличение чувствительности голографического интерферометра ограничивается, по сути, только возможными спекл-шумами, которые могут ухудшить контраст полос интерференционной картины.

#### Выводы

Показано, что наличие цифровой информации об объектных и опорных волнах, о зафиксированной ПЗС-матрицей интерференционной картине позволяет производить над этими данными различные математические операции, после которых их снова можно вывести на экран, т. е. визуализировать. Указанные операции можно проводить как на участках от объекта до выходной плоскости, так и на выходе системы, непосредственно с распределением интенсивности, которое фиксирует ПЗС матрица.

Предложена последовательность численных операций, позволяющая увеличить чувствительность голографической системы в два раза. Показано, что предложенная схема увеличения чувствительности голографического интерферометра может быть обобщена на случай увеличения чувствительности в  $2^m$  раз, где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Также показано, что увеличение чувствительности по указанной схеме ограничено только возможными спекл-шумами, которые могут ухудшить контраст полос интерференционной картины.

#### Список литературы:

1. Tiziani H. J., Pedrini G. From speckle pattern photography to digital holographic interferometry // Applied optics. 2013. V. 52. №1. P. 30-44. <https://doi.org/10.1364/AO.52.000030>
2. Georges M. P., Thizy C., Languy F., Zhao Y., Vandenrijt J. F. Digital holographic interferometry and speckle interferometry applied on objects with heterogeneous reflecting properties // Applied Optics. 2019. V. 58. №34. P. G318-G325. <https://doi.org/10.1364/AO.58.00G318>
3. Yaroslavsky L., Astola J. Introduction to Digital Holography. V. 1. Bentham E-book Series: Digital Signal Processing in Experimental Research». – 2009.
4. Nehmetallah G., Banerjee P. P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging // Advances in Optics and Photonics. 2012. V. 4. №4. P. 472-553. <https://doi.org/10.1364/AOP.4.000472>
5. Feng P., Wen X., Lu R. Long-working-distance synthetic aperture Fresnel off-axis digital holography // Optics express. 2009. V. 17. №7. P. 5473-5480. <https://doi.org/10.1364/OE.17.005473>
6. Исманов Ю. X. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник Киргизского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2015. №4. С. 194-198.
7. 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>

8. Zhao J., Jiang H., Di J. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography // *Optics express*. 2008. V. 16. №4. P. 2514-2519. <https://doi.org/10.1364/OE.16.002514>
9. Maripov A. R., Ismanov Y. The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography // *Journal of optics*. 1994. V. 25. №1. P. 3. <https://doi.org/10.1088/0150-536x/25/1/002>
10. 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>
11. Gil S. K. Proposal for Analog Signature Scheme Based on RSA Digital Signature Algorithm and Phase-shifting Digital Holography // *Current Optics and Photonics*. 2020. V. 4. №6. P. 483-499.
12. Liu J., Cao L., Stoykova E., Ferraro P., Memmolo P., Blanche P. A. Digital Holography and 3D Imaging 2020: introduction to the feature issue // *JOSA A*. 2021. V. 38. №2. P. DH1-DH2. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.419210>
13. Osten W., Faridian A., Gao P., Körner K., Naik D., Pedrini G., Wilke M. Recent advances in digital holography // *Applied optics*. 2014. V. 53. №27. P. G44-G63. <https://doi.org/10.1364/AO.53.000G44>
14. 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>
15. Исманов Ю. X., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной // *Материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов*. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596 -597.
16. Исманов Ю. X., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // *Вестник Киргизского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова*. 2017. №3. С. 171-178.
17. Исманов Ю. X., Тынышова Т. Д., Абдулаев А. А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. №3. С. 98-102.

#### References:

1. Tiziani, H. J., & Pedrini, G. (2013). From speckle pattern photography to digital holographic interferometry. *Applied optics*, 52(1), 30-44. <https://doi.org/10.1364/AO.52.000030>
2. Georges, M. P., Thizy, C., Languy, F., Zhao, Y., & Vandenrijt, J. F. (2019). Digital holographic interferometry and speckle interferometry applied on objects with heterogeneous reflecting properties. *Applied Optics*, 58(34), G318-G325. <https://doi.org/10.1364/AO.58.00G318>
3. Yaroslavsky, L., & Astola, J. (2009). *Introduction to Digital Holography*. V. 1. Bentham E-book Series: Digital Signal Processing in Experimental Research.
4. Nehmetallah, G., & Banerjee, P. P. (2012). Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging. *Advances in Optics and Photonics*, 4(4), 472-553. <https://doi.org/10.1364/AOP.4.000472>
5. Feng, P., Wen, X., & Lu, R. (2009). Long-working-distance synthetic aperture Fresnel off-axis digital holography. *Optics express*, 17(7), 5473-5480. <https://doi.org/10.1364/OE.17.005473>
6. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Interferometriya na osnove metoda besschelevoi raduzhnoi golografii. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*, (4), 194-198. (in Russian).

7. 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>
8. Zhao, J., Jiang, H., & Di, J. (2008). Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography. *Optics express*, 16(4), 2514-2519. <https://doi.org/10.1364/OE.16.002514>
9. Maripov, A. R., & Ismanov, Y. (1994). The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography. *Journal of optics*, 25(1), 3. <https://doi.org/10.1088/0150-536x/25/1/002>
10. 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>
11. Gil, S. K. (2020). Proposal for Analog Signature Scheme Based on RSA Digital Signature Algorithm and Phase-shifting Digital Holography. *Current Optics and Photonics*, 4(6), 483-499.
12. Liu, J., Cao, L., Stoykova, E., Ferraro, P., Memmolo, P., & Blanche, P. A. (2021). Digital Holography and 3D Imaging 2020: introduction to the feature issue. *JOSA A*, 38(2), DH1-DH2. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.419210>
13. Osten, W., Faridian, A., Gao, P., Körner, K., Naik, D., Pedrini, G., ... & Wilke, M. (2014). Recent advances in digital holography. *Applied optics*, 53(27), G44-G63. <https://doi.org/10.1364/AO.53.000G44>
14. 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>
15. Ismanov, Yu. Kh., Dzhamankyrov, N. K., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2018). Vosstanovlenie besshchelevoi raduzhnoi gologrammy kogerentnoi volnoi. In *Materialy VII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov. M.: NIYaU MIFI* (pp. 596-597). (in Russian).
16. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2017). Ispol'zovanie priblizheniya Frenelya dlya rascheta raspredeleniya svetovogo polya, proshedshego skvoz' reshetku. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*, (3), 171-178. (in Russian).
17. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Abdulaev, A. A. (2020). Modelirovanie opticheskoi sistemy, rabotayushchei pri nekogerentnom osveshchenii. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, (3), 98-102. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 25.04.2022 г.

Принята к публикации  
31.04.2022 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Повышение эффективности голографического интерферометра // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. №6. С. 14-22. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/79/01>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., & Tynyshova, T. (2022). Improving the Efficiency of a Holographic Interferometer. *Bulletin of Science and Practice*, 8(6), 14-22. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/79/01>