

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«СИБОПТИКА-2018»**

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск  
СГУГиТ  
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск  
*А. В. Шабурова*

Кандидат технических наук, директор КТИ НП СО РАН, Новосибирск  
*П. С. Завьялов*

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией  
лазерных информационных систем ИЛФ СО РАН, Новосибирск  
*Б. В. Поллер*

Доктор технических наук, профессор, директор КТИ НП СО РАН, Новосибирск  
*Ю. В. Чугуй*

Доктор технических наук, зав. лабораторией КТИ НП СО РАН, Новосибирск  
*И. Г. Пальчикова*

Доктор физико-математических наук, зав. отделом  
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
*В. В. Кузнецов*

Директор ФГУП «СНИИМ», г. Новосибирск  
*Г. В. Шувалов*

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГУГиТ, Новосибирск  
*Ю. Ц. Батомункуев*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 277 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2018».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

© СГУГиТ, 2018

## РЕГИСТРАЦИЯ И РАСШИФРОВКА ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

### *Владимир Иванович Гужов*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных, тел. (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

### *Сергей Петрович Ильиных*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, тел. (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

### *Дмитрий Сергеевич Хайдуков*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных, тел. (383)346-08-46, e-mail: demon-angelok@yandex.ru

В статье описана система для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. Для расшифровки используется преобразование Френеля. В отличие от классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии можно получить комплексную математическую голограмму, которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля. Значения амплитуд и фаз находят по серии голограмм с помощью методов пошагового фазового сдвига. Комплексная амплитуда рассеянного от объекта поля восстанавливается преобразованием Френеля над математической голограммой. Приведена оптическая схема голографической установки. Показаны результаты регистрации и восстановления цифровой голограммы.

**Ключевые слова:** голография, оптическая микроскопия, интерференция, цифровая голография, преобразование Френеля, преобразование Фурье, пошаговый фазовый сдвиг.

## REGISTRATION AND DECODING OF DIGITAL HOLOGRAMS

### *Vladimir I. Guzhov*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, Department of Systems for Data Collection and Processing, phone: (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

### *Sergej P. Ilinykh*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Computer Engineering, phone: (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

### *Dmitrij S. Hajdukov*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Assistant Professor, Department of Systems for Data Collection and Processing, phone: (383)346-08-46, e-mail: demon-angelok@yandex.ru

The article describes the system for registration and decryption of digital holograms by the method of step-by-step phase shift. The Fresnel transform is used for decryption. In contrast to the

classical holograms, which represent a picture of the intensity, using digital holography it is possible to obtain a complex mathematical hologram, which consists of the amplitude and phase of the object field. The values of amplitudes and phases are found by a series of holograms using the methods of step-by-step phase shift. The complex amplitude of the scattered field from the object is restored by Fresnel transformation over a mathematical hologram. The optical scheme of holographic installation is given. Results of registration and restoration of the digital hologram are shown.

**Key words:** holography, optical microscopy, interference, digital holography, Fresnel transform, Fourier transform, phase sampling, phase shifting interferometry, PSI.

### *Введение*

Современные методы экспериментального исследования геометрической формы различного рода объектов, широко используют методы цифровой голографии [1–12]. Основной проблемой при восстановлении голограмм является перекрытие нулевым порядком дифракции действительного и мнимого изображений. Э. Лейт и Ю. Упатниекс нашли решение проблемы, увеличив угол между интерферирующими пучками [13]. Это позволило получать изображения, которые при наблюдении не перекрываются. Для такой схемы при угле между интерферирующими полосами в 30 градусов необходим регистрирующий материал с разрешающей способностью не менее 0,5 мкм. Цифровые матрицы фотоприемников не могут на текущий момент обеспечить столь высокое пространственное разрешение. Поэтому при использовании методов цифровой голографии приходится уменьшать угол между интерферирующими волновыми полями, что неизбежно приводит к перекрытию спектров в разных дифракционных порядках.

Целью статьи является описание системы для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. В качестве регистратора используется матрица фотоприемников.

### *Получение и расшифровка цифровых голограмм*

В отличие от регистрации классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии можно получить комплексную математическую голограмму [14], которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля:

$$G(x, y) = a_p(x, y) \exp(\varphi_p(x, y)), \quad (1)$$

где  $a_p(x, y)$  – амплитуда поля,  $\varphi_p(x, y)$  – фаза поля, распространенного от объекта в плоскости голограммы  $(\eta, \xi)$ .

Найти значения амплитуды и фазы можно по набору голограмм (картин интерференции объектного и опорного пучков регистрируемых в плоскости

цифровой матрицы фотодетекторов) с помощью методов пошагового фазового сдвига (phase sampling, phase shifting interferometry – PSI).

Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известную величину. Фазовый сдвиг между интерферирующими пучками может быть реализован различными способами. Наиболее часто фазовый сдвиг задается с помощью зеркала, закрепленного на пьезокерамике. В зависимости от числа фазовых сдвигов существуют различные алгоритмы расшифровки.

Анализируя интерференционные картины можно найти распределение разности фаз  $\phi(x, y)$  интерферирующих пучков [15-18].

Зная разность фаз  $\phi(x, y)$  и фазу опорной волны  $\varphi_r(x, y)$ , можно определить и исходное фазовое распределение  $\varphi_p(x, y)$ .

$$\varphi_p(x, y) = \phi(x, y) - \varphi_r(x, y) \quad (2)$$

Для формирования математической голограммы необходимо также определить амплитуду волнового поля  $a_p(x, y)$ , отраженного от объекта, в плоскости голограммы. Значения амплитуд объектного и опорного пучка можно определить перекрытием соответствующих пучков в оптической схеме. По уже имеющемуся набору голограмм с фазовым сдвигом можно определить амплитуду объектного пучка получить методом пошагового сдвига, используя этот же набор голограмм [19, 20].

Из математической голограммы  $G(x, y)$  можно восстановить комплексную амплитуду поля рассеянного от объекта. Комплексную амплитуду  $\Gamma(r, s)$  можно определить с помощью преобразование Френеля над  $G(x, y)$  [21, 22]:

$$\Gamma(r, s) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left[i\frac{2\pi d}{\lambda}\right] \exp\left[i\frac{\pi\left[(r\Delta\xi)^2 + (s\Delta\eta)^2\right]}{\lambda d}\right] \times \sum_k^{N_x-1} \sum_l^{N_y-1} b_1(k, l) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}\left[(k\Delta\xi)^2 + (l\Delta\eta)^2\right]\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{N}(kr + ls)\right] \quad (3)$$

где  $d$  – расстояние от голограммы до плоскости восстановления,  $\lambda$  – длина волны,  $N$  – число точек при оцифровке голограммы,  $\Delta\xi = 2X_{\max} / N$  и  $\Delta\eta = 2Y_{\max} / N$  – размер одного дискретного значения,  $X_{\max}$  и  $Y_{\max}$  – размер оцифрованного участка голограммы.

Отметим, что (3) восстанавливает только одно изображение и проблемы с перекрытием пучков не возникает. Алгоритм преобразования Френеля обеспечивает простое масштабирование восстановленного изображения, однако это накладывает ряд ограничений на конструкцию измерительной системы, в част-

ности, верхняя и нижняя границы допустимого расстояния от плоскости объекта до плоскости записи голограммы становятся значимым фактором [23].

### Экспериментальная установка

Оптическая схема регистрации цифровых голограмм показана на рис. 1.

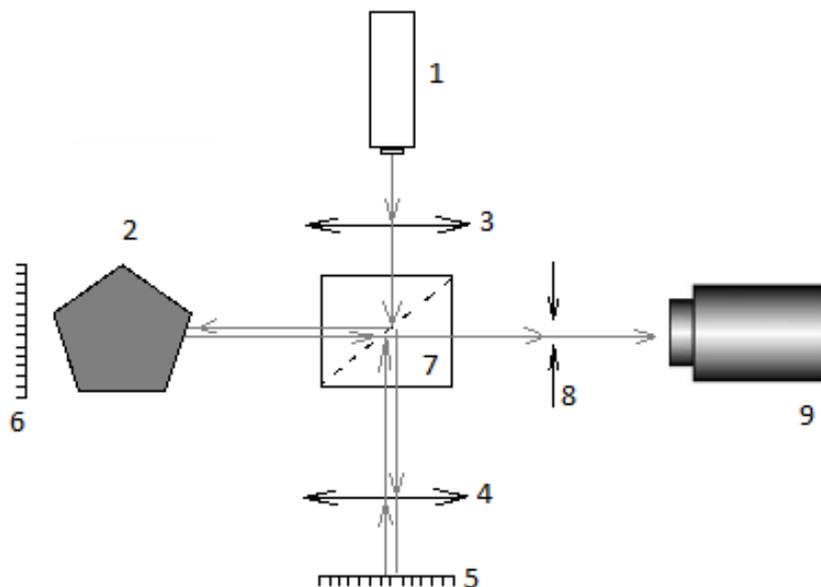


Рис. 1. Схема записи цифровой голограммы:

лазер – 1; объект – 2; коллиматор – 3; фильтр – 4; зеркала – 5, 6; разделительный кубик – 7; диафрагма – 8; фотокамера – 9

В качестве объекта использовался юбилейный серебряный значок с эмблемой Новосибирского государственного технического университета. На рис. 2 показаны результаты интерференции между опорным и объектным пучками при изменении фазового угла сдвига  $\delta_1 = 0^\circ$ ,  $\delta_2 = 90^\circ$ ,  $\delta_3 = 180^\circ$ ,  $\delta_4 = 270^\circ$ . Интерференционные картины проецировались непосредственно на цифровую матрицу фотоприемника.

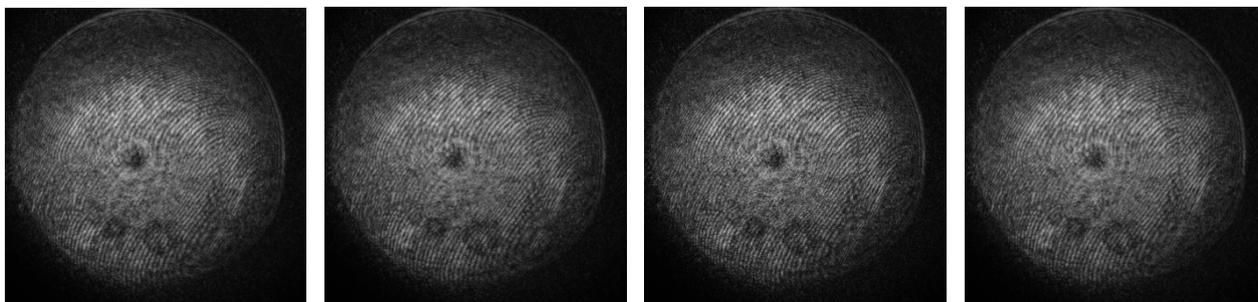


Рис. 2. Интерференционные картины при изменении фазового угла сдвига  $\delta_1 = 0^\circ$ ,  $\delta_2 = 90^\circ$ ,  $\delta_3 = 180^\circ$ ,  $\delta_4 = 270^\circ$

Фаза и амплитуда определялись по алгоритму [18–20], затем формировалась математическая голограмма (1). На рис. 3 показаны амплитуда  $a_p(x,y)$  и фаза  $\varphi_p(x,y)$  математической голограммы.

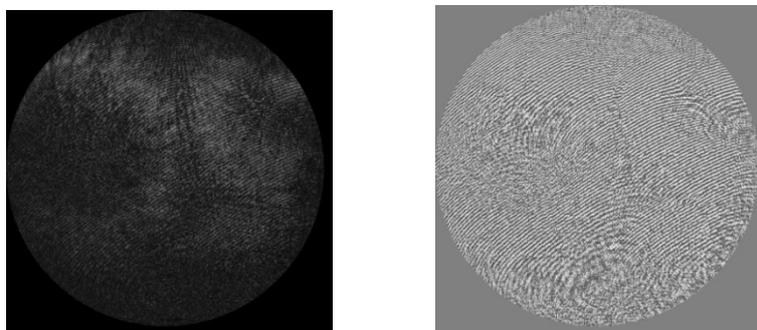


Рис. 3. Амплитуда и фаза математической голограммы

Действительное изображение восстанавливалось по математической голограмме с помощью преобразования Френеля. Размер объекта составляет 7 мм, расстояние до объекта равно 135 мм. Результат восстановления показан на рис. 4.



Рис. 4. Восстановленная амплитуда (слева) и исходный объект (справа)

Низкое качество при восстановлении изображения на рис. 4 вызвано отклонением профиля опорного пучка от плоского.

### *Заключение*

Разработана система для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. Цифровая голография в отличие от классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии регистрируют комплексную математическую голограмму, которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля. Значения амплитуды и фазы определяются по набору серии голограмм с помощью

методов пошагового фазового сдвига. Преобразование Френеля над комплексной математической голограммой восстанавливает комплексную амплитуду поля, рассеянного от объекта. Приведена оптическая схема голографической установки. Показаны результаты регистрации и восстановления цифровой голограммы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка и исследование методов компьютерной голографической интерферометрии объектов сложной формы» (Грант № 18-08-00580).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xu Xianfeng, Zhang Zhiwei, Wang Zecheng, Wang Jing, Zhan Kaiyun, Jia Yulei, Jiao Zhiyong. Robust digital holography design with monitoring setup and reference tilt error elimination // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57. – P. B205–B211.
2. Byeon Hyeokjun, Go Taesik, Lee Sang Joon. Digital stereo-holographic microscopy for studying three-dimensional particle dynamics // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 6–13.
3. Yao Longchao, Chen Jun, Sojka Paul E., Wu Xuecheng, Cen Kefa. Three-dimensional dynamic measurement of irregular stringy objects via digital holography // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43. – P. 1283–1286.
4. Häussler R., Leister N., Stolle H. Large holographic 3D display for real-time computer-generated holography // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10335. – P. 103350X.
5. Banerjee Partha P., Osten Wolfgang, Pascal Picart, Cao Liangcai, Nehmetallah George. Digital Holography and 3D Imaging // *Journal of the Optical Society of America*. – 2017. – Vol. B 34. – P. DH1–DH4.
6. Abdelsalam D. G., Yasui Takeshi. High brightness, low coherence, digital holographic microscopy for 3D visualization of an in-vitro sandwiched biological sample // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – P. F1–F6.
7. Gómez M., Lobera J., Arroyo M. P., Andres N., Pallarés J., Palero V. R. Digital Holography for the analysis of the migration and deposition of magnetic particles on the walls of microchannels // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (online)*. – 2017. – paper Tu2A.3.
8. Soumaya Kara Mohammed, Larbi Bouamama, Derradji Bahloul, Pascal Picart. Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – P. F158–F166.
9. Tahara Tatsuki, Otani Reo, Omae Kaito, Gotohda Takuya, Arai Yasuhiko, Takaki Yasuhiro. Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25. – P. 11157–11172.
10. Öhman Johan, Sjö Dahl Mikael. Off-axis digital holographic particle positioning based on polarization-sensitive wavefront curvature estimation // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – P. 7503–7510.
11. Wu Yumin, Song Guoqing, Feng Yunpeng. Development and Application of Digital Holographic Microscopy in Biomedicine // *Imaging Science and Photochemistry*. – 2016. – Vol. 34 (1). – P. 23–29.
12. Kim Myung K. Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy // *Journal of the Optical Society of Korea*. – 2010. – Vol. 14 (2). – P. 77–89.
13. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // *Journal of the Optical Society of America*. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.

14. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография. – М. : Наука, 1982. – 219 с.
15. Гужов В. И., Ильиных С. П. Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия : учеб. пособие. – М. : Юрайт, 2-е издание, 2018. – 258 с.
16. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry / V. Guzhov, S. Ilinykh, R. Kuznetsov, D. Haydukov // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52 (3). P. 030501-1–030501-2.
17. Гужов В. И., Ильиных С. П., Хайдуков Д. С., Вагизов А. Р. Универсальный алгоритм расшифровки // *Научный вестник НГТУ*. – 2010. – № 4 (41) – С. 51–58.
18. Ильиных С. П., Гужов В. И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Автометрия*. – 2002. – № 3. – С. 123–126.
19. Гужов В. И., Ильиных С. П., Хайбулин С. В. Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками // *Автометрия*. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 101–106.
20. Гужов В. И., Ильиных С. П. Определение интенсивности опорного и объектного пучков при использовании метода пошагового фазового сдвига // *Автоматика и программная инженерия*. – 2017. – № 4 (22). – С. 68–73.
21. Представление преобразования Френеля в дискретном виде / В. И. Гужов, Р. Б. Несин, В. А. Емельянов // *Автоматика и программная инженерия*. – 2016. – № 1 (15). – С. 91–96.
22. Williams L. A., Nehmetallah G., Aylo R., Banerjee P. P. Application of up-sampling and resolution scaling to Fresnel reconstruction of digital holograms // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54 (6). P. 1443–1452.
23. Область возможного применения дискретных преобразований Фурье и Френеля / В. И. Гужов, В. А. Емельянов, Д. С. Хайдуков // *Автоматика и программная инженерия*. – 2016. – № 1 (15). – С. 97–103.

## REFERENCES

1. Xu, X., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, J., Zhan, K., Jia, Y., & Jiao Z. (2018). Robust digital holography design with monitoring setup and reference tilt error elimination. *Applied Optics*, 57, B205–B211.
2. Byeon, H., Go, T., & Lee S. J. (2018). Digital stereo-holographic microscopy for studying three-dimensional particle dynamics. *Optics and Lasers in Engineering*, 105, 6–13.
3. Yao, L., Chen, J., Sojka, P. E., Wu, X., & Cen, K. (2018). Three-dimensional dynamic measurement of irregular stringy objects via digital holography. *Optics Letters*, 43, 1283–1286.
4. Häussler, R., Leister, N., & Stolle H. (2017). Large holographic 3D display for real-time computer-generated holography. *Proceedings of SPIE*, Vol. 10335, 103350X.
5. Banerjee, P. P., Osten, W., Pascal, P., Cao, L., & Nehmetallah, G. (2017). Digital Holography and 3D Imaging: introduction to the joint feature issue in *Applied Optics* and *Journal of the Optical Society of America B*. *Journal of the Optical Society of America B* 34, DH1–DH4.
6. Abdelsalam, D. G., & Yasui, T. (2017). High brightness, low coherence, digital holographic microscopy for 3D visualization of an in-vitro sandwiched biological sample. *Applied Optics*, 56, F1–F6.
7. Gómez, M., Lobera, J., Arroyo, M. P., Andres, N., Pallarés, J., & Palero, V. R. (2017). Digital Holography for the analysis of the migration and deposition of magnetic particles on the walls of microchannels. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (online), paper Tu2A.3. <https://doi.org/10.1364/DH.2017.Tu2A.3>
8. Soumaya, K. M., Larbi, B., Derradji, B., & Pascal, P. (2017). Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography. *Applied Optics*, 56, F158–F166.
9. Tahara, T., Otani, R., Omae, K., Gotohda, T., Arai, Y., & Takaki, Y. (2017). Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts. *Optics Express*, 25, 11157–11172.

10. Öhman, J., & Sjö Dahl, M. (2016). Off-axis digital holographic particle positioning based on polarization-sensitive wavefront curvature estimation. *Applied Optics*, 55, 7503–7510.
11. Wu, Y., Song, G., & Feng, Y. (2016). Development and Application of Digital Holographic Microscopy in Biomedicine. *Imaging Science and Photochemistry*, 34(1), 23–29.
12. Kim, Myung K. (2010). Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(2), 77–89.
13. Leith, E. N., & Upatnieks, J. (1962). Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52, 1123–1130.
14. Yaroslavsky, L. P., & Merzlyakov, N. S. (1982). *Tsifrovaya golografiya* [Digital holography]. Moscow: Science [in Russian].
15. Guzhov, V. I., & Ilinykh, S. P. (2018). *Opticheskie izmereniya. Komp'yuternaya interferometriya* [Optical measurements. Computer interferometry]. Moscow: Yurayt, 2-nd edition [in Russian]. ISBN: 978-5-534-06855-9.
16. Guzhov, V., Ilinykh, S., Kuznetsov, R., & Haydukov, D. (2013). Generic Algorithm of Phase Reconstruction in Phase-Shifting Interferometry. *Optical Engineering*, 52(3), 030501-1–030501-2.
17. Guzhov, V. I., Ilinykh, S. P., Khaydukov, D. S., & Vagizov, A. R. (2010). Universal Decryption Algorithm. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Bulletin NSTU], 4(41), 51–58 [in Russian].
18. Ilyinykh, S. P., & Guzhov, V. I. (2002). A Generalized Decoding Algorithm for Interferograms using Phase Stepping. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 3, 103–106.
19. Guzhov, V. I., Ilinykh, S. P., & Khaibullin, S. V. (2017). Phase Information Recovery Based on the Methods of Step-By-Step Phase Shear with Small Angles between Interfering Beams. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(3), 288–293.
20. Guzhov, V. I., & Ilyinykh, S. P. (2017). Determination of the Intensity of the Reference and Object Beams when Using the Phase-Shift Interferometry. *Avtomatika i Programmnyaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 4(22), 68–73 [in Russian].
21. Guzhov, V. I., Nesin, R. B., & Emelyanov, V. A. (2016). Presentation of Fresnel Transform in the Discrete Form. *Avtomatika i Programmnyaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 1(15), 91–96 [in Russian].
22. Williams, L. A., Nehmetallah, G., Aylo, R., & Banerjee, P. P. (2015). Application of Up-sampling and Resolution Scaling to Fresnel Reconstruction of Digital Holograms. *Applied Optics*, 54(6), 1443–1452.
23. Guzhov, V. I., Emelyanov, V. A., & Hajdukov, D. S. (2016). The Area of Possible Application of Discrete Fourier transform. *Avtomatika i Programmnyaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 1(15), 97–103. [in Russian].

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Д. С. Хайдуков, 2018